UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Energía.

Tesis Doctoral

DESARROLLO DE UN MÉTODO RÁPIDO BASADO EN TÉCNICAS DE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN FLÚOR DE MUESTRAS DE MINERAL DE FLUORITA.

Autor: D: Miguel Ángel Rey Ronco.

Oviedo, Mayo 2007.

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Energía.

Tesis Doctoral.

DESARROLLO DE UN MÉTODO RÁPIDO BASADO EN TÉCNICAS DE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN FLÚOR DE MUESTRAS DE MINERAL DE FLUORITA.

Autor: D: Miguel Ángel Rey Ronco.

Directora: Dra. Dña. Teresa de Jesús Alonso Sánchez

Codirector: Dr. D. Jorge Xiberta Bernat

Oviedo, Mayo 2007

A mis hijas, Susana Laura y Teresa
que me lo han pedido, y, por supuesto
a mi mujer.

Agradecimientos:

Es justo manifestar mi agradecimiento a aquellas personas que han colaborado o apoyado mi trabajo en el desarrollo de esta Tesis.

A Antonia Buergo por su comprensión a la hora de compartir los equipos.

A Fernando y Pilar, que me han ayudado con entusiasmo en tareas muy repetitivas y tediosas.

A José Manuel Pérez Iglesias, que ha facilitado los equipos del Laboratorio de Energía Nuclear sin los cuales no se hubiera podido llevar a cabo la Tesis, y por su buena disposición para colaborar.

A José Alonso, Director de la empresa MINERSA, por su apoyo incondicional y su entusiasmo. Siempre he podido contar con su colaboración en todos los aspectos. Sus ideas, sus opiniones están reflejados en aspectos cruciales de esta Tesis.

A Jorge Xiberta, por su apoyo desde el primer momento, sus ánimos y consejo.

A mi directora y esposa, verdadera alma de la tesis.

Resumen:

Los métodos químicos utilizados en una planta de concentración de fluorita, para la determinación del flúor, adolecen de la necesidad de un tratamiento previo de la muestra y un tiempo de análisis elevado.

En la presente Tesis Doctoral se plantea un método de análisis del flúor basado en la activación neutrónica, cuyas características principales son la rapidez del análisis, pocos minutos, y su precisión, independientemente del valor de la ley.

El análisis por activación neutrónica es una técnica suficientemente conocida. Para llevarla a cabo se utiliza, muy frecuentemente reactores nucleares termales. En la Tesis se hace un pequeño repaso sobre los reactores de investigación de uso en activación neutrónica, y diversas entidades que realizan estos análisis.

Se repasan los conceptos fundamentales de la activación neutrónica, explicando el significado de términos como sección eficaz, tasa de decaimiento, actividad inducida, etc.

Se continúa enunciando las características principales del flúor y se hace una breve descripción de otros métodos de análisis que da como resultado su ineficacia para analizar el flúor.

Finalmente se concluye el primer bloque de la Tesis donde se aportan unos fundamentos teóricos sobre reacciones nucleares, importantes para entender el resto del desarrollo.

En un segundo bloque se describen los fundamentos teóricos de la instrumentación que se usa para la detección de los rayos gamma, punto clave en el proceso de activación neutrónica.

En un tercer bloque, se analizan todos los aspectos relacionados con la muestra, y con el análisis de la misma. En este bloque se muestran las secciones eficaces de todos los posibles elementos que pueden aparecer en la muestra.

En el capítulo 6 se exponen los dos prototipos diseñados y construidos para llevar a cabo la activación y se describen todos los pasos que se han dado para llegar al diseño y construcción definitivo.

En el siguiente bloque se exponen los resultados de todas las mediciones realizadas sobre distintos conjuntos de muestras para posteriormente, en el capítulo 7 analizar estos datos y elaborar varios modelos matemáticos con la ayuda de programas estadísticos.

Las conclusiones del análisis matemático confirman la viabilidad del proceso de activación neutrónica para la detección del flúor.

En el último bloque, se expone un desarrollo teórico que mejorará la resolución del proceso de activación neutrónica.

Palabras clave:

Activación neutrónica, flúor, fluorita, planta de concentración, análisis elemental, detección de rayos gamma.

Abstract:

The chemical methods used in a fluorine concentrator plant, for the fluorine determination, need a previous treatment of the sample and a high analysis time.

In this Doctoral Thesis a method for the fluorine analysis based on the neutron activation is presented, which basic characteristics are the immediacy of the analysis, a few minutes, and its accuracy, independently of the grade value. The analysis using neutron activation is a technology well-known. To perform it, nuclear thermal reactors are frequently used. In this work a brief review on the investigation reactors to use in the neutron activation is done, and also of different organizations performing these works.

The basic concepts on the neutron activation are reviewed, explaining the meaning of different concepts, such as: effective section, rate of decay, induced activity, etc.

It continues describing the basic characteristics of the fluorine and a brief description of other analysis methods, which conclude on its inefficiency for fluorine analysis.

The first section of the Thesis is ended where a few theoretical concepts on nuclear reactions are given.

In the second section the theoretical foundations of the instrumentation used for the detection of the gamma ray are described, this is the key point in the process of neutron activation.

In the third section, all the aspects related to the sample are studied, and with the analysis too. In this section the effective section of all the possible elements that can appear in the sample are shown.

In Chapter 6 both designed and built prototypes to perform the activation are presented, and also, the different steps that were taken to come to the final design and construction are described.

In the next section all the results from the measurements made on different sets of samples are presented so that, in Chapter 7 all these data is analyzed and several mathematical models are built using statistical programs.

The final conclusions from the mathematical analysis confirm the viability of the neutron activation process for the fluorine determination.

In the final section, a theoretical development which will improve the resolution of the neutron activation process is shown.

Key words:

Neutron activation, fluorine, concentrator, elemental analysis, gamma ray detection.

INDICE DE CONTENIDOS.

1. Introducción. 1

1.1. Algunas entidades y organizaciones que realizan análisis por activación neutrónica. 3

1.2. Algunas aplicaciones del análisis por activación neutrónica. 4

2. Metodología general. 6

3. Estado actual de los conocimientos científicos y técnicos. 8

3.1. Técnicas de activación neutrónica. 8
3.1.1. Activación con neutrones. 15
3.1.2. Sección eficaz. 16
3.1.3. Tasa de decaimiento. 17
3.1.4. Actividad inducida. 18
3.1.5. Interferencias nucleares. 19

3.2. Características principales del flúor. 20
3.2.1. Aplicaciones del flúor. 22
3.2.2. Historia del flúor. 22
3.2.3. Abundancia y obtención 23
3.2.4. Compuestos del flúor. 23
3.2.5. Papel biológico del flúor. 24
3.2.6. Isótopos del flúor. 24
3.2.7. Precauciones 24

3.3. Métodos de análisis del flúor. 24
3.3.1. Métodos químicos. 24
3.3.2. Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo. ICP-MS. 25
3.3.3. Emisión de Rayos X inducida por protones (PIXE). 26
3.3.4. Espectrometría de estructura fina de absorción de Rayos X. (XAFS) 27
3.3.5. Espectroscopia de resonancia magnética nuclear. 28
3.3.6. Espectrometría de absorción atómica. (AAS). 29

3.4. Fundamentos teóricos de las reacciones nucleares. 29
3.4.1. Tipos de reacciones con los neutrones 31
3.4.1.1. Reacciones de dispersión. 31
3.4.1.2. Reacciones de absorción. Captura radiactiva. 33
3.4.2. Productos de decaimiento radiactivo. 34
3.4.2.1. Partículas α. 37
3.4.2.2. Partículas β. 38
3.4.2.3. Rayos X. 43
3.4.2.4. Conversión interna. 45
3.4.2.5. Rayos γ. 47
3.4.2.6. Emisión de neutrones. 47
3.4.2.7. Emisión de protones. 48
3.4.2.8. Captura de electrones. 49
3.4.3. Análisis de los esquemas de decaimiento 49
3.4.3.1. Decaimiento β sin líneas de transición de Rayos Gamma. 50
3.4.3.2. Decaimiento β involucrando una transición de Rayos γ. 51
3.4.3.3. Decaimiento complejo. 52
3.4.3.4. Decaimiento por la emisión de un positrón y la captura de un electrón. 55
3.4.3.5. Relación de ramificación. 57

4. Equipamiento e instrumentación usados en activación neutrónica. 61

4.1. Instalaciones de irradiación. 61
4.1.1. Reactores nucleares de investigación. 63

4.1.1.1. Tipos de reactores de investigación. 63
4.1.1.2. Manipulación de la muestra en el reactor. 68
4.1.1.3. Activación en un reactor. 72
4.1.1.4. Distribución del flujo de neutrones. 73
4.1.2. Generadores de neutrones. 74
4.1.3. Fuentes isotópicas. 77
4.1.3.1. Fuentes isotópicas alfa neutrón. 79
4.1.3.2. Espectro de neutrones a partir de la fisión espontánea del californio 252. 81
4.2. Detectores de radiación gamma. 81
4.2.1. Detectores de centelleo. 84
4.2.2. Otros detectores de centelleo. 88
4.3. Fotomultiplicador. 89
4.4. El preamplificador. 90
4.5. El amplificador. 94
4.6. Convertidor analógico digital (ADC). 96
4.6.1. Características de los convertidores analógico digitales. 99
4.7. Contenedores de la muestra para la irradiación. 107
5. Estudio teórico de las reacciones nucleares en una muestra de fluorita. 109
5.1. Composición elemental de una muestra de fluorita. 118
5.1.1. Procedencia de la muestra a analizar. 118
5.1.2. Muestra procedente de una mina. 119
5.1.3. Muestra procedente de distintos puntos del lavadero. 119
5.1.4. Especificaciones del producto final. 122
5.1.5. Resumen de los elementos de interés. 122
5.2. Estudio del flúor. 123
5.2.1. Reacción 9-F-19(n,p)8-O-19 128
5.2.2. Reacción 9-F-19(n,g)9-F-20. 130
5.2.3. Reacción 9-F-19(n,a)7-N-16 134
5.2.3.1. El decaimiento del Nitrógeno 16 135
5.2.3.2. Interferencias del 16N. 138
5.2.4. Conclusiones de las reacciones del flúor con los neutrones. 143
5.3. Estudio del Calcio. 145
5.3.1. Reacciones del 40Ca con los neutrones. 145
5.3.1.1. Reacción 20-CA-40(n,α)18-AR-37. 150
5.3.1.2. Reacción 20-CA-40(n,p)19-K-40 151
5.3.2. Reacciones del 44Ca con los neutrones. 152
5.3.3. Conclusiones de las reacciones del Calcio con los neutrones. 155
5.4. Estudio del silicio. 155
5.4.1. Reacciones del 28Si con los neutrones. 155
5.4.1.1. Reacción 14-Si-28 (n,p)13-Al-28. 160
5.4.1.2. Reacción 14-SI-28(n,α)12-MG-25. 160
5.4.1.3. Reacción 14-SI-28(n,g)14-SI-29. 160
5.4.2. Reacciones del 29Si con los neutrones. 161
5.4.2.1. Reacción 14-SI-29(n,α)12-MG-26. 164
5.4.2.2. Reacción 14-SI-29(n,p)13-AL-29. 164
5.4.3. Reacciones del ^{30}Si con los neutrones. 165
5.4.3.1. Reacción 14-Si-30(n,α)12-Mg-27. 168
5.4.4. Conclusiones de las reacciones de la Sílice con los neutrones. 168
5.5. Estudio del S. 169

5.5.1. Reacciones del 32S con los neutrones. 169
5.5.1.1. Reacción 16-S-32(n,α)14-Si-29. 171
5.5.2. Reacciones del 34 S con los neutrones. 172
5.5.2.1. Reacción 16-S-34(n,α)14-Si-31. 174
5.5.3. Conclusiones de las reacciones del Azufre con los neutrones. 175
5.6. Estudio del Ba. 175
5.6.1. Reacciones del 134Ba con los neutrones. 176
5.6.1.1. Reacción 56-Ba-134(n,g)56-Ba-135. 181
5.6.2. Reacciones del 135Ba con los neutrones. 182
5.6.3. Reacciones del 136Ba con los neutrones. 187
5.6.4. Reacciones del 137Ba con los neutrones. 193
5.6.4.1. Reacción 56-Ba-137(n,g)56-Ba-138. 197
5.6.5. Reacciones del 138Ba con los neutrones. 198
5.6.5.1. Reacción 56-Ba-138(n,g)56-Ba-139. 203
5.6.6. Conclusiones de las reacciones del Bario con los neutrones. 206
5.7. Estudio del Hierro. 206
5.7.1. Reacciones del 54Fe con los neutrones. 206
5.7.1.1. Reacción 26-Fe-54(n,a)24-Cr-51. 211
5.7.2. Reacciones del 56Fe con los neutrones. 212
5.7.3. Reacciones del 56Fe con los neutrones. 218
5.7.3.1. Reacción 26-FE-56(n,2n)26-FE-55. 224
5.7.3.2. Reacción 26-FE-56(n,p)25-MN-56. 225
5.7.4. Reacciones del 57Fe con los neutrones. 226
5.7.5. Conclusiones de las reacciones del Hierro con los neutrones. 229
5.8. Estudio del fósforo. 229
5.8.1. Reacciones del 31P con los neutrones. 229
5.8.1.1. Reacción 15-P-31(N,2A)11-NA-24 237
5.8.1.2. Reacción 15-P-31(n,α)13-AL-28 238
5.8.1.3. Reacción 15-P-31(n,p)14-SI-31. 239
5.8.2. Conclusiones de la reacción del Fósforo con los neutrones. 239
5.9. Estudio del Mg. 239
5.9.1. Reacciones del 24Mg con los neutrones. 240
5.9.1.1. Reacción 12-Mg-24(n,α)10-Ne-21. 243
5.9.1.2. Reacción 12-Mg-24(n,p)11-Na-24. 243
5.9.2. Reacciones del 25Mg con los neutrones. 245
5.9.2.1. Reacción 12-Mg-25(n,α)10-Ne-22. 248
5.9.3. Reacciones del 26Mg con los neutrones. 248
5.9.3.1. Reacción 12-Mg-26(n,g)12-Mg-27. 251
5.9.4. Conclusiones de las reacciones del Magnesio con los neutrones. 252
5.10. Estudio del Arsénico. 252
5.10.1. Reacciones del 75As con los neutrones. 253
5.10.1.1. Reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76 257
5.10.1.2. Reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72 261
5.10.1.3. Reacción 33-AS-75(n,p)32-GE-75 264
5.10.2. Conclusiones de las reacciones del Arsénico con los neutrones. 268
5.11. Estudio del Hg. 268
5.11.1. Reacciones del 198Hg con los neutrones. 269
5.11.1.1. Reacción 80-Hg-198(n,g)80-Hg-199. 270
5.11.2. Reacciones del 199Hg con los neutrones. 272
5.11.3. Reacciones del 200Hg con los neutrones. 274
5.11.4. Reacciones del 201Hg con los neutrones. 276
5.11.5. Reacciones del 202Hg con los neutrones. 278
5.11.6. Reacciones del 204Hg con los neutrones. 279
5.11.6.1. Reacción 80-Hg-204(n,2n)80-Hg-203 281
5.11.7. Conclusiones de las reacciones del Mercurio con los neutrones. 282

5.12. Estudio del Oxígeno.... 282
5.12.1. Reacciones del 16O con los neutrones.... 283
5.12.1.1. Reacción 8-O-16(n,α)6-C-13. 299
5.12.2. Conclusiones de las reacciones del Oxígeno con los neutrones.... 299

5.13. Estudio del hidrógeno. 299
5.13.1. Reacciones del 1H con los neutrones. 300
5.13.2. Conclusiones de las reacciones del Hidrógeno con los neutrones.... 303

5.14. Conclusiones de las reacciones de los elementos de la fluorita con los neutrones.... 304

6. Desarrollo experimental y exposición de resultados.... 306

6.1. Consideraciones generales sobre las medidas.... 308
6.1.1. Tiempo de irradiación.... 308
6.1.2. Tiempo de lectura.... 313
6.1.3. Resolución del detector y nivel de energía de los rayos gamma emitidos.. 314

6.2. Equipo e instrumentación utilizada.... 316
6.2.1. La fuente de neutrones y su contenedor.... 317
6.2.2. El detector 322
6.2.3. Zócalo del tubo foto multiplicador - preamplificador. Modelo 2007 P. 323
6.2.4. Fuente de alta tensión ORTEC 556/556H.... 325
6.2.5. Convertidor analógico digital Canberra 8701.... 328
6.2.6. Contenedor ORTEC modelo 4001A.... 331
6.2.7. Analizador multicanal Canberra 100.... 332
6.2.8. Software System 100. 334
6.2.9. Sistemas de control de área. 336

6.3. Comprobación y calibración de la instrumentación.... 337

6.4. Conjunto de muestras analizadas. 342

6.5. Diseño, fabricación, procedimiento de operación y ensayos con el primer prototipo de analizador de fluorita. 344
6.5.1. Descripción del primer prototipo.... 348
6.5.2. Fabricación del primer prototipo.... 351
6.5.3. Procedimiento de operación.... 360
6.5.4. Ensayos con el primer prototipo.... 363
6.5.5. Conclusiones de los ensayos con el primer prototipo y sus modificaciones.378

6.6. Diseño fabricación y ensayos con el segundo prototipo.... 379
6.6.1. Relación de medidas obtenidas con el segundo prototipo.... 385

7. Discusión y análisis de los resultados.... 397

7.1. Visualización del espectro de emisión del ^{16}N.... 397

7.2. Estudio del fondo detectado.... 405
7.2.1. Espectro gamma teórico de la fuente de neutrones.... 405
7.2.2. Perfil del fondo obtenido experimentalmente. 409

7.3. Análisis preliminares de la respuesta de una muestra de masa y ley determinada. 410

7.4. Análisis a través de modelos.... 415
7.4.1. Primer modelo. 416
7.4.2. Segundo modelo.... 443
7.4.3. Tercer modelo.... 460
7.4.4. Conclusiones. 461

8. Mejoras del proceso de activación neutrónica para la fluorita. ... 473

8.1. Posibilidades de mejora de la señal en función del modelo.... 473

8.2. Aumento del flujo de neutrones en la muestra..... 474
8.3. Procedimiento básico..... 477
8.3.1. Tiempo de lectura óptimo para dar una señal máxima..... 480
8.3.2. Influencia del fondo en el tiempo óptimo de lectura. 485
8.4. Ciclo repetido. 489
8.4.1. Evolución de la señal en relación con el número de ciclos de activación para unos tiempos de proceso determinados. 492
8.4.2. Determinación del número de ciclos óptimo para un tiempo de proceso determinado..... 501
8.4.2.1. Análisis en la zona de paralelismo. 509
8.4.2.2. Análisis del número de ciclos en la zona límite. 512
8.4.3. Conclusiones respecto al número óptimo de ciclos. 524
8.5. Efecto del tiempo de desplazamiento en el cálculo del tiempo óptimo. 528
9. Recapitulación final. 539
9.1. Crítica de los resultados..... 540
9.2. Propuestas de investigaciones futuras en esta línea. 541
9.3. Conclusiones 542

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Principio de la activación neutrónica. 8
Figura 2. Equipo ICP-MS. 25
Figura 3. Limites de detección para los distintos elementos para el método ICP-MS. (http://www.elementalanalysis.com/). 26
Figura 4. Limites de detección para los distintos elementos para el método PIXE. (http://www.elementalanalysis.com/). 27
Figura 5. Límites de detección para los distintos elementos para el método XAFS. (http://www.elementalanalysis.com/). 28
Figura 6. Modos de decaimiento radiactivo de un elemento. 34
Figura 7. Tipo de producto de decaimiento natural. 36
Figura 8. Leyenda de la Figura 7 36
Figura 9. Rango en que varían los tiempos de decaimiento. 36
Figura 10. Leyenda de la Figura 9 37
Figura 11. Decaimiento alfa. 37
Figura 12. Decaimiento β- del 11C. 39
Figura 13. Decaimiento del 60Co con la emisión de una partícula β-. 39
Figura 14. Tiempos de decaimiento del 60Co con la emisión de una partícula.β-. 40
Figura 15. Esquema de decaimiento del 60Co. 40
Figura 16. Decaimiento β+ del 10C. 41
Figura 17. Decaimiento del 65Zn con la emisión de una partícula β+ 41
Figura 18. Tiempos de decaimiento del 65Zn. 42
Figura 19. Esquema de decaimiento del 65Zn. 43
Figura 20. Decaimiento del 58 Co. 44
Figura 21. Decaimiento del 60Co. 45
Figura 22. Esquema de decaimiento del 60Co. 46
Figura 23. Emisión de neutrones. 48
Figura 24. Emisión de protones. 48
Figura 25. Captura de electrones 49
Figura 26. Esquema de decaimiento del 35S. 50
Figura 27. Esquema de decaimiento del 28Al 52
Figura 28. Esquema de decaimiento del 46mSc. 53
Figura 29. Esquema de decaimiento del 46Sc 55
Figura 30. Esquema de decaimiento del 65Zn. 56
Figura 31. Esquema de decaimiento del 198Au. 58
Figura 32. Esquema de decaimiento del 198Au. 58
Figura 33. Esquema de decaimiento del 60Co. 60
Figura 34. Espectro de energía de neutrón de un reactor típico mostrando los distintos componentes usados para describir las regiones de energía de los neutrones. 61

Figura 35. Imágenes del reactor canadiense Slowpoke. 66
Figura 36. Núcleo del reactor Triga. 67
Figura 37. Dispositivo portamuestras para irradiar muestras en un reactor. 69
Figura 38. Diagrama esquemático de una activación cíclica. 71
Figura 39. Dependencia angular la energía del neutrón y variación de la sección eficaz de la reacción D-T para diferentes energías de los deuterios incidentes. 76
Figura 40. Dependencia angular la energía del neutrón y variación de la sección eficaz de la reacción D-T para diferentes energías de los deuterios incidentes. 76
Figura 41. Dependencia angular la energía del neutrón y variación de la sección eficaz de la reacción D-T para diferentes energías de los deuterios incidentes. 77
Figura 42. Espectro de energía de la fuente de 252Cf. 78
Figura 43. Espectro de energía de una fuente de 241Am-Be 79
Figura 44. Comparación de los espectros de energía de fuentes isotópicas. 79
Figura 45. Representación esquemática de una cámara de ionización 82
Figura 46. Diferentes regímenes de funcionamiento de los detectores a gas en función de la tensión aplicada. 83
Figura 47. Régimen de funcionamiento de un detector Geiger-Muller. 83
Figura 48. Propiedades físicas de los cristales de centelleo inorgánicos más habituales. (Saint Gobain Crystals). 87
Figura 49. Dependencia energética del dosímetro de película fotagráfica frente a Rayos X. 89
Figura 50. Detetor básico y amplificador. 90
Figura 51. Pulsos típicos del preamplificador. 92
Figura 52. Pulsos típicos del amplificador. 95
Figura 53. Rampa y tren de pulsos de un ADC. 97
Figura 54. Principio del convertidor ADC del tipo FDT. 98
Figura 55. Proceso de conversión FDT. 99
Figura 56.Distinta frecuencia e igual número de canales. 101
Figura 57. Distinto número de canales y la misma frecuencia. 102
Figura 58. Igual frecuencia y distinta altura del pulso. 102
Figura 59. Distinto offset. 103
Figura 60. Tiempo de disparo de coincidencia y pulso de entrada. 106
Figura 61. Página principal de la National Nuclear Data Center. 111
Figura 62. Búsqueda de las reacciones con el 19F. 112
Figura 63. Tipos de reacciones con neutrones. 112
Figura 64. Búsqueda de las reacciones del 19F con los neutrones que produzcan radiación α. 113
Figura 65. Listado de referencias de las reacciones de tipo 19F(n,α). 114
Figura 66. Solicitud de la gráfica de las secciones eficaces para la reacción 19F(n,α). 115
Figura 67. Respuesta a la solicitud hecha a la base de datos EXFOR de las secciones eficaces de la reacción 19F(n.α). 115

Figura 68. Pantalla de la aplicación ZVView para la reacción 19F(n,α).....116
Figura 69. Página principal de la base de datos NuDat.....116
Figura 70. Resultado de la búsqueda para el 16N en la base NuDat. 117
Figura 71. Resultado de la búsqueda en la base de datos NuDat de las características de decaimiento del 16N.....118
Figura 72. Diagrama de una planta de concentración de fluorita. 121
Figura 73. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,2n)9-F-18. 124
Figura 74. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. 124
Figura 75. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,D)8-O-18. 124
Figura 76. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,EL)9-F-19. 125
Figura 77. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,g)9-F-20..... 125
Figura 78. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,INL)9-F-19..... 125
Figura 79. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(N,NON). 126
Figura 80. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,p)8-O-19. 126
Figura 81. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,SCT)9-F-19. 126
Figura 82. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,THS)9-F-19. 127
Figura 83. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,TOT). 127
Figura 84. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(N,X)0-G-0. 127
Figura 85. Sección eficaz de la reacción 9F19(n,g)9F20. 130
Figura 86. Energía de los rayos gamma de captura de la reacción 9F19(n,g)9F20. 133
Figura 87. Esquema de decaimiento del 20F. 134
Figura 88. Secciones eficaces de la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16 135
Figura 89. Esquema de decaimiento del 16N..... 136
Figura 90. Espectro teórico de emisión del 16N. 137
Figura 91. Secciones eficaces de las reacciones que pueden producir 16N..... 139
Figura 92. Sección eficaz de la reacción 4-BE-9(4-BE-9,N+p)7-N-16. 139
Figura 93. Sección eficaz dela reacción 5-B-11(3-LI-7,N+p)7-N-16. 139
Figura 94. Sección eficaz dela reacción 5-B-11(3-LI-7,X)7-N-16..... 140
Figura 95. Sección eficaz dela reacción 6-C-12(7-N-17,X)7-N-16. 140
Figura 96. Sección eficaz dela reacción 7-N-15(D,P)7-N-16..... 140
Figura 97. Sección eficaz dela reacción 8-O-16(n,p)7-N-16..... 141
Figura 98. Sección eficaz dela reacción 8-O-17(n,D)7-N-16. 141
Figura 99. Sección eficaz dela reacción 8-O-18(D,A)7-N-16. 141
Figura 100. Sección eficaz dela reacción 8-O-18(G,D)7-N-16. 142
Figura 101. Sección eficaz dela reacción 8-O-18(G,N+p)7-N-16. 142
Figura 102. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (a) 142
Figura 103. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (b) 143
Figura 104. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (c) 143
Figura 105. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (total) 143

Figura 106. Secciones eficaces delas reacciones que den lugar a la presencia de 16N en la muestra de fluorita. 144
Figura 107. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,2n)20-CA-39 145
Figura 108. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,α)18-AR-37. 146
Figura 109. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,D)19-K-39. 146
Figura 110. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,g)20-CA-41. 146
Figura 111. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,INL)20-CA-40 147
Figura 112. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,n+α)18-AR-36 147
Figura 113. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,n+p)19-K-39 147
Figura 114. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,p)19-K-40 148
Figura 115. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,T)19-K-38 148
Figura 116. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,THS)20-CA-40 148
Figura 117. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,TOT) 149
Figura 118. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(N,X)0-G-0 149
Figura 119. Sección eficaz de la reacción 20-CA-44(n,α)18-AR-41 152
Figura 120. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,D)19-K-43. 153
Figura 121. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,g)20-Ca-45. 153
Figura 122. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,INL)20-Ca-44. 153
Figura 123. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,p)19-K-44. 154
Figura 124. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,THS)20-Ca-44. 154
Figura 125. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,TOT). 154
Figura 126. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,2n)14-SI-27 156
Figura 127. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(N,4-BE-7)10-NE-22 156
Figura 128. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,α)12-MG-25. 156
Figura 129. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,EL) 157
Figura 130. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,g)14-SI-29 157
Figura 131. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,INL)14-SI-28 157
Figura 132. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,n+p)13-AL-27. 158
Figura 133. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,p)13-Al-28. 158
Figura 134. Sección eficaz de la reacción -SI-28(n,p+α)11-NA-24 158
Figura 135. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,TOT) 159
Figura 136. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(N,X)0-G-0. 159
Figura 137. Sección eficaz de la reacción 14-Si29(N,2P)12-Mg-28. 161
Figura 138. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,α)12-MG-26. 161
Figura 139. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,EL). 162
Figura 140. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,g)14-SI-30. 162
Figura 141. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,INL)14-SI-29 162
Figura 142. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,n+p)13-AL-28. 163
Figura 143. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,p)13-AL-29 163

Figura 144. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(N,X)13-AL-28 163
Figura 145. Sección eficaz de la reacción 14-Si-30(n,α)12-Mg-27..... 165
Figura 146. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,EL)14-SI-30..... 165
Figura 147. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,g)14-SI-31 166
Figura 148. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,INL)14-SI-30 166
Figura 149. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,n+p)13-AL-29. 166
Figura 150. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,p)13-AL-30..... 167
Figura 151. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,THS)14-SI-30 167
Figura 152. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(N,X)13-AL-29. 167
Figura 153. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,2n)16-S-31..... 169
Figura 154. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,α)14-Si-29 170
Figura 155. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,EL)16-S-32 170
Figura 156. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,T)15-P-30 170
Figura 157. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,TOT)..... 171
Figura 158. Sección eficaz de la reacción 16-S-34(n,α)14-Si-31 172
Figura 159. Sección eficaz de la reacción 16-S-34(n,EL)16-S-43 172
Figura 160. Sección eficaz de la reacción 16-S-34(n,g)16-S-35 173
Figura 161. Sección eficaz de la reacción 16-S-33(n,p)15-P-33 173
Figura 162. Sección eficaz de la reacción 16-S-33(n,p)15-P-33 173
Figura 163. Sección eficaz de la reacción 16-S-33(n,p)15-P-33 174
Figura 164. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,2n)56-Ba-133-M..... 176
Figura 165. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,3n)56-Ba-132..... 176
Figura 166. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,α)54-Xe-131-M 177
Figura 167. Sección eficaz de la reacción 177
Figura 168. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,g)56-Ba-135 177
Figura 169. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,g+X)..... 178
Figura 170. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,INL)56-Ba-134 178
Figura 171. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,T)56-Cs-132 178
Figura 172. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,n+p)55-Cs-133 179
Figura 173. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,non)..... 179
Figura 174. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,p)55-Cs-134-G 179
Figura 175. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,p+n)55-Cs-133 180
Figura 176. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,p+X)..... 180
Figura 177. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,T)55-Cs-132 180
Figura 178. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,TOT) 181
Figura 179. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,2n)56-Ba-134..... 182
Figura 180. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,3n)56-Ba-133-G 182
Figura 181. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,non)..... 183
Figura 182. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,g)56-Ba-136 183

Figura 183. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,g+X) 183
Figura 184. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,2n)56-Ba-135-M 184
Figura 185. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,n+p)55-Cs-134-G 184
Figura 186. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,n+X) 184
Figura 187. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,non) 185
Figura 188. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,p)55-CS-135-M 185
Figura 189. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,p+n)55-Cs-134-G 185
Figura 190. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,p+X) 186
Figura 191. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,TOT) 186
Figura 192. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,2n)56-Ba-135-M 187
Figura 193. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,3n)56-Ba-134 187
Figura 194. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,α)54-Xe-133-M 188
Figura 195. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,non) 188
Figura 196. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,g)56-Ba-137 188
Figura 197. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,g)56-Ba-137 189
Figura 198. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,g+X) 189
Figura 199. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,INL)56-Ba-136-M 189
Figura 200. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,n+p)55-Cs-135-G 190
Figura 201. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,n+X) 190
Figura 202. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,non) 190
Figura 203. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,p)55-CS-136-G 191
Figura 204. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,p+n)55-Cs-135-G 191
Figura 205. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,p+X) 191
Figura 206. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,SCT)56-Ba-136 192
Figura 207. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,TOT) 192
Figura 208. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,2n)56-Ba-136-M 193
Figura 209. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,3n)56-Ba-135-G 193
Figura 210. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,non) 193
Figura 211. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,g)56-Ba-138 194
Figura 212. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,g+X) 194
Figura 213. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,INL)56-Ba-137-M 194
Figura 214. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,n+p)55-CS-136 195
Figura 215. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,n+X) 195
Figura 216. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,non) 195
Figura 217. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,p)55-Cs-137 196
Figura 218. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,p+n)55-Cs-136 196
Figura 219. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,p+X) 196
Figura 220. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,SCT)56-Ba-137 197
Figura 221. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,TOT) 197

Figura 222. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,2n)56-Ba-137-M..... 198
Figura 223. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,3n)56-Ba-136..... 198
Figura 224. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,α)54-Xe-135-M 199
Figura 225. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,EL)56-Ba-138 199
Figura 226. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,g)56-Ba-139 199
Figura 227. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,g+X)..... 200
Figura 228. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,2n)56-Ba-137-M..... 200
Figura 229. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,n+3P)53-I-135-M 200
Figura 230. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,n+p)55-Cs-137 201
Figura 231. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,n+X)..... 201
Figura 232. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,p)55-Cs-138-G 201
Figura 233. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,p+n)55-Cs-137 202
Figura 234. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,p+X)..... 202
Figura 235. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,SCT)56-Ba-138 202
Figura 236. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,TOT) 203
Figura 237. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(N,X)55-Cs-137 203
Figura 238. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,2n)26-Fe-53-M..... 206
Figura 239. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,3n)26-Fe52-G 207
Figura 240. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,a)24-Cr-51..... 207
Figura 241. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,d)25-Mn-53 207
Figura 242. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,el)26-Fe-54 208
Figura 243. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,g)26-Fe55..... 208
Figura 244. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,inl)26-Fe54 208
Figura 245. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,n+p)25-Mn-53..... 209
Figura 246. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,p)25-Mn-54 209
Figura 247. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,t)25-Mn-52-M..... 209
Figura 248. Sección eficaz de la reacción -Fe-54(n,ths)26-Fe-54 210
Figura 249. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,tot)..... 210
Figura 250. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,x)1-H-1..... 210
Figura 251. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,2n)26-Fe-55-M..... 212
Figura 252. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,3n)26-Fe-54..... 212
Figura 253. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(N,4-Be-7)22-Ti-50 213
Figura 254. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,α)24-Cr-53 213
Figura 255. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,D)25-Mn-55..... 213
Figura 256. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,EL)26-Fe-56 214
Figura 257. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,g)26-Fe-57 214
Figura 258. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,g+n)26-Fe-56..... 214
Figura 259. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,INL)26-Fe-56 215
Figura 260. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,n+α)24-Cr-52..... 215

Figura 261. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,n+p)25-Mn-55 215
Figura 262. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,non) 216
Figura 263. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,p)25-Mn-56 216
Figura 264. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,T)25-Mn-54 216
Figura 265. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,THS)26-Fe-56 217
Figura 266. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,TOT) 217
Figura 267. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,2n)26-Fe-55-M 217
Figura 268. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,2n)26-FE-55. 218
Figura 269. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,3n)26-FE-54 218
Figura 270. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(N,4-BE-7)22-TI-50 219
Figura 271. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,α)24-CR-53 219
Figura 272. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,D)25-MN-55 219
Figura 273. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,EL) 220
Figura 274. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,g)26-FE-57 220
Figura 275. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,g+n)26-FE-56 220
Figura 276. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,INL)26-FE-56. 221
Figura 277. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,n+α)24-CR-52 221
Figura 278. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,n+p)25-MN-55 221
Figura 279. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,non) 222
Figura 280. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,p)25-MN-56 222
Figura 281. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,T)25-MN-54 222
Figura 282. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,THS)26-FE-56. 223
Figura 283. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,TOT). 223
Figura 284. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(N,X)0-G-0. 223
Figura 285. Sección eficaz de la reacción 226
Figura 286. Sección eficaz de la reacción 227
Figura 287. Sección eficaz de la reacción 227
Figura 288. Sección eficaz de la reacción 227
Figura 289. Sección eficaz de la reacción 228
Figura 290. Sección eficaz de la reacción 228
Figura 291. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-57(N,X)2-He-4 228
Figura 292. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(N,2A)11-NA-24. 229
Figura 293. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,2n)15-P-30 230
Figura 294. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,α)13-AL-28 230
Figura 295. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,α+X) 230
Figura 296. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,α+n)13-AL-27 231
Figura 297. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,αBS) 231
Figura 298. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,EL)15-P-31 231
Figura 299. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,g)15-P-32. 232

Figura 300. Sección eficaz de la reacción 232
Figura 301. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,g)15-P-32 232
Figura 302. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,INL)15-P-31..... 233
Figura 303. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+2P)13-AL-29..... 233
Figura 304. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+3P)12-MG-28..... 233
Figura 305. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+p)14-SI-30..... 234
Figura 306. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+X) 234
Figura 307. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,non) 234
Figura 308. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,p)14-SI-31 235
Figura 309. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,p+X), ... 235
Figura 310. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,SCT)15-P-31 235
Figura 311. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,THS)15-P-31 236
Figura 312. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,TOT)..... 236
Figura 313. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(N,X)0-G-0 236
Figura 314. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,2n)12-MG-23 240
Figura 315. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,α)10-Ne-21..... 240
Figura 316. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,EL)12-MG-24 241
Figura 317. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,g)12-MG-25..... 241
Figura 318. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,INL)12-MG-24..... 241
Figura 319. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,n+α)10-Ne-20 242
Figura 320. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,p)11-Na-24..... 242
Figura 321. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,TOT) 242
Figura 322. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(N,X)0-G-0 243
Figura 323. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,α)10-Ne-22..... 245
Figura 324. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,p)11-Na-24..... 245
Figura 325. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,g)12-Mg-26 246
Figura 326. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,INL)12-Mg-25 246
Figura 327. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,n+p)10-Na-24 246
Figura 328. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,p)11-Na-25..... 247
Figura 329. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,TOT) 247
Figura 330. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,n+p)11-Na-24 247
Figura 331. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,α)10-Ne-23..... 248
Figura 332. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,n+p)11-Na-25 249
Figura 333. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,g)12-Mg-27 249
Figura 334. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(N,He3)10-Ne-24 249
Figura 335. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,INL)12-Mg-26 250
Figura 336. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,T)11-Na-24..... 250
Figura 337. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,p)11-Na-26..... 250
Figura 338. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,TOT) 251

Figura 339. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,n+p)11-Na-25 251
Figura 340. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76 253
Figura 341. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72 254
Figura 342. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(N,2P)31-GA-74 254
Figura 343. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,EL) 254
Figura 344. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,n+2P)31-GA-73 255
Figura 345. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,abs) 255
Figura 346. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,p)32-GE-75 255
Figura 347. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,TOT) 256
Figura 348. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,n+3P)30-ZN-72 256
Figura 349. Esquema de decaimiento del 7633As 260
Figura 350. Esquema de decaimiento del 7532 Ge. 267
Figura 351. Sección eficaz de la reacción 33-As-75(n,α)31Ga-72 267
Figura 352. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,2n)80-Hg-197-M 269
Figura 353. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,g)80-Hg-199 269
Figura 354. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,INL)80-Hg-198 269
Figura 355. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,n+p)79-Au-198-G 270
Figura 356. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,p)79-Au-198-G 270
Figura 357. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-199(n,n+p)79-Au-198-G 272
Figura 358. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-199(n,INL)80-Hg-199-M 273
Figura 359. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-199(n,n+p)79-Au-198-G 273
Figura 360. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,2n)80-Hg-199-M 274
Figura 361. Sección eficaz de la reacción -Hg-200(n,α)78-Pt-197 274
Figura 362. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,n+p)79-Au-199 274
Figura 363. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,g)80-Hg-201 275
Figura 364. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,INL)80-Hg-200 275
Figura 365. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,p)79-Au-200 275
Figura 366. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-201(n,n+p)79-Au-200 276
Figura 367. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-201(n,g)80-Hg-202 276
Figura 368. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,n+p)79-Au-200 277
Figura 369. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-201(n,p)79-Au-201 277
Figura 370. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,TOT) 277
Figura 371. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-202(n,α)78-Pt-199 278
Figura 372. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-202(n,g)80-Hg-203 278
Figura 373. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-202(n,INL)80-Hg-202 279
Figura 374. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,2n)80-Hg-203 279
Figura 375. 80- Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,α)78-Pt-201 280
Figura 376. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,g)80-Hg-205 280
Figura 377. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,INL)80-Hg-204 280

Figura 378. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,2A)4-Be-9 283
Figura 379. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,2ª+n)4-Be-8 283
Figura 380. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,2G)8-O-17 284
Figura 381. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,2n)8-O-15 284
Figura 382. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,2n+2P)6-C-13 284
Figura 383. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,2n+α)6-C-11 285
Figura 384. Sección eficaz de la reacción -O-16(n,2n+p)7-N-14 285
Figura 385. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α)6-C-13 285
Figura 386. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+2n)6-C-11 286
Figura 387. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+n)6-C-12 286
Figura 388. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+n+α)4-Be-8 286
Figura 389. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+n+p)5-B-11 287
Figura 390. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D)7-N-15 287
Figura 391. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+α)5-B-11 287
Figura 392. Sección eficaz de la reacción -O-16(n,D+n)7-N-14 288
Figura 393. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+n+p)6-C-13 288
Figura 394. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+p)6-C-14 288
Figura 395. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+p+n)6-C-13 289
Figura 396. Sección eficaz de la reacción -O-16(n,INL)8-O-16 289
Figura 397. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,g)8-O-17 289
Figura 398. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,INL)8-O-16 290
Figura 399. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+2A)4-Be-8 290
Figura 400. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+2P)6-C-14 290
Figura 401. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+α)6-C-12 291
Figura 402. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+D)7-N-14 291
Figura 403. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+D+p)6-C-13 291
Figura 404. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p)7-N-15 292
Figura 405. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p+α)5-B-11 292
Figura 406. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p+n)7-N-14 292
Figura 407. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p+X)6-C-13 293
Figura 408. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,non) 293
Figura 409. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p)7-N-16 293
Figura 410. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+2n)7-N-14 294
Figura 411. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+2n+p)6-C-13 294
Figura 412. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+α)5-B-12 294
Figura 413. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+α+n)5-B-11 295
Figura 414. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+D)6-C-14 295
Figura 415. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+D+n)6-C-13 295
Figura 416. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+n)7-N-15 296

Figura 417. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+n+α)5-B-11 296
Figura 418. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+n+p)6-C-14 296
Figura 419. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,T)7-N-14 297
Figura 420. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,T+n)7-N-13 297
Figura 421. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,T+p)6-C-13 297
Figura 422. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,THS)8-O-16 298
Figura 423. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,TOT) 298
Figura 424. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,X)0-G-0 298
Figura 425. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(N,2G)1-H-2 300
Figura 426. Sección eficaz de la reacción -H-1(n,ABS) 300
Figura 427. Sección eficaz de la reacción -H-1(n,EL)1-H-1 300
Figura 428. Sección eficaz de la reacción -H-1(n,EL)1-H-1 en la zona de emisión de la fuente 301
Figura 429. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,g)1-H-2 301
Figura 430. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,INL)1-H-1 302
Figura 431. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,THS)1-H-1 302
Figura 432. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,TOT) 302
Figura 433. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,TOT) en el intervalo de emisión de la fuente. 303
Figura 434. Sección eficaz para la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16 306
Figura 435. Balance de núcleos de 16N 309
Figura 436. Variación de la concentración de 16N con el tiempo de irradiación. 311
Figura 437. Variación de la concentración de 16N después de un tiempo de irradiación de 36 s 312
Figura 438. Influencia del tiempo de irradiación y del tiempo de demora de la medida. 313
Figura 439. Relación señal ruido 314
Figura 440. Respuesta de dos detectores con distinta resolución. 315
Figura 441. Parámetros de la función resolución. 316
Figura 442. Contenedor cilíndrico de la fuente. 318
Figura 443. Operación estandar de activación con el contenedor original. 320
Figura 444. Esquema funcional: Modelo 2007P. 325
Figura 445. Primer prototipo. 348
Figura 446. Diseño detallado del primer prototipo 350
Figura 447. Disposición del prototipo 1 en posición de medida. 360
Figura 448. Posición en situación de introducción de la muestra y de medida de la muestra irradiada. 361
Figura 449. Posición en situación de irradiación. 362
Figura 450. Gráfica intensidad distancia. 366

Figura 451. Contenedor con la fuente en las posiciones: retraída, para introducir la muestra (a) y de irradiación de la muestra por contacto lateral con la fuente (b). 375

Figura 452. Contenedor con la fuente en las posiciones: retraída para introducir la muestra (a) y de irradiación de la muestra por contacto inferior directo (b)... 376

Figura 453. Segundo prototipo..... 380

Figura 454. Contenedor provisional realizado para el desplazamiento de la fuente... 382

Figura 455. Contenedor abierto relleno de parafina. 382

Figura 456 Segundo prototipo modificado para colocar blindaje de ladrillos de plomo. 383

Figura 457. Representación de las primeras lecturas realizadas con el segundo prototipo..... 386

Figura 458. Espectro de una muestra de fluorita. 400

Figura 459. Suma de espectros de fondo y de muestras de distintas leyes. En el recuadro se muestran las leyes..... 401

Figura 460. Suma de espectros de fondo y de muestras de distintas leyes. El número de datos de partida es muy bajo. 402

Figura 461. Discriminación entre fondo y espectro de muestra de fluorita de baja ley. 403

Figura 462. Espectro de muestras de fluorita y de fondo obtenido como media móvil con intervalos de cinco unidades..... 404

Figura 463. Esquema de la cadena radiactiva del 241 Americio..... 405

Figura 464. Distribución de las energías gamma originados al hacer incidir partículas α de 10MeV en un objetivo de Berilio. 408

Figura 465. Niveles de energía del decaimiento del 12C. 409

Figura 466. Fondo obtenido experimentalmente. 410

Figura 467. Consideraciones geométricas para el primer y segundo modelo..... 417

Figura 468. Análisis del modelo según MATLAB. 421

Figura 469. Ajustes de las medias a la ecuación $C_1 = \frac{A' \cdot m}{m + B'}$ para el intervalo de energía indicado (ley constante). 422

Figura 470. Ajustes de las medias a la ecuación $C_1 = \frac{A' \cdot m}{m + B'}$ en el intervalo de energía indicado. (ley constante)..... 423

Figura 471. Representación en EXCEL de las cuentas para distintas leyes con masas constantes. Intervalo de energías 4,5-6 MeV..... 424

Figura 472. Curvas en abanico. Representación en EXCEL de las cuentas para distintas leyes con masas constantes. Intervalo de energías 4,5-6,5 MeV..... 425

Figura 473. Representación de la ecuación en el estudio llevado con MATLAB. 426

Figura 474. Consideraciones geométricas para el tercer modelo..... 460

Figura 475. Representación tridimensional de la superficie matemática correspondiente al modelo 1 con los parámetros del intervalo de energía comprendido entre 4,5 y 6 MeV. 463

Figura 476. Representación tridimensional de la superficie matemática correspondiente al modelo 2 con los parámetros del intervalo de energía comprendido entre 4,5 y 6 MeV..... 464

Figura 477. Representación simbólica de los modelos..... 465

Figura 478. Representación tridimensional de la ley, según el primer modelo, para el intervalo de energía entre 4,5 y 6 MeV. 467

Figura 479. Representación de la ley - cuentas según el modelo 1..... 468

Figura 480. Representación cuentas – masa para distintas leyes, según el modelo 1. 468

Figura 481. Comparativa entre el análisis químico y la activación neutrónica, de las muestras usadas en la deducción del modelo..... 469

Figura 482. Comparativa entre el análisis químico y la activación neutrónica, de muestras no usadas en la deducción del modelo. 471

Figura 483. Comparativa entre el análisis químico y la activación neutrónica, de muestras no usadas en la deducción del modelo y de leyes y masas dispares.. 472

Figura 484. Influencia de la respuesta a la activación de muestras de fluorita al modificar distintos parámetros. 474

Figura 485. Procesos que tienen lugar en la realización práctica de la activación neutrónica..... 475

Figura 486. Influencia del ángulo sólido..... 476

Figura 487. Eficiencia del fotopico para detectores de centelleo de NaI(Tl) y de BGO, de 38mmx38 mm..... 477

Figura 488. Curva de activación g(t): Evolución de la concentración de 16N durante la irradiación. 478

Figura 489. Evolución de los valores relativos de 16N presentes en la muestra según el tiempo, en un proceso de activación neutrónica. 480

Figura 490. Ciclo de un periodo de irradiación y un periodo de medida. 481

Figura 491. A* para un tiempo de irradiación variable y un tiempo de ciclo constante, T=120 s. A*= (1-e(-λ*τ))*(1-e(-λ*(120-τ))) 482

Figura 492. Representación de la función A* y su derivada con respecto a τ, para un tiempo de ciclo constante e igual a 120 s. A*= (1-e(-λ*τ))*(1-e(-λ*(120-τ))) y dA/dt..... 483

Figura 493. Evolución de la función A* para distintos tiempos de proceso..... 484

Figura 494. Evolución de la señal relativa $A^*_{\max}$, en función del tiempo de ciclo con tiempos de irradiación iguales a T/2..... 485

Figura 495. Evolución de la señal para muestras de leyes de fluorita de 4 y 60% y evolución de la señal para el fondo en base a lecturas realizadas en el laboratorio con los distintos prototipos..... 487

Figura 496. Intersección de la derivada de la señal con muestras del 60%, y la derivada de la señal inferior del fondo. 488

Figura 497. Intersecciones de las derivadas de la señal para muestras de ley 60 y 4%, y de las derivadas de la señal superior e inferior del fondo..... 488

Figura 498. Detalle de la Figura 495 en las que se ha incorporado las curvas de relación señal/fondo para ambas leyes. 489

Figura 499. $A^{*1ciclo}$ y $A^{*nciclos}$ (cuentas relativas) usando el mismo tiempo de proceso con distintos ciclos múltiples. 491

Figura 500. $A_{\max}^{*nciclos} = A_{\max}^{nciclos}\lambda / K$, para un tiempo de proceso de 120 s, según el número de activaciones. 492

Figura 501. Evolución de $A_{\max}^{*nciclos}$ según el número de activaciones, para distintos tiempos de proceso, según la ecuación [31]. 493

Figura 502. Representación en detalle de las curvas de la Figura 501. 494

Figura 503. Representación en detalle de las curvas de la Figura 501. 495

Figura 504. Ganancia relativa G con activaciones múltiples para distintos tiempo de proceso entre 40 s y 300 s. según la ec. [33]. 496

Figura 505. Representación en detalle de las curvas de la Figura 504. 498

Figura 506. Representación en detalle de las curvas de la Figura 504. 499

Figura 507. Representación conjunta de a) número de ciclos óptimo y b) tiempo de activación, para distintos tiempos de proceso. 501

Figura 508. Resolución gráfica de la ecuación [35], para $n_{op} = 1$. 503

Figura 509. Resolución gráfica de la ecuación [35], para $n_{op} = 2$ 503

Figura 510. Resolución gráfica de la ecuación [36]. 504

Figura 511. Gráfica que representa la ec. [37]. 505

Figura 512. Representación de la función $A_{\max}^{*nciclos} = n\left(1 - e^{-\frac{\lambda T}{2n}}\right)^2 = A_{\max}^{nciclos}\frac{\lambda}{K}$ versus tiempo de proceso T, para distintos valores de n. 507

Figura 513. Zonas en la función $A_{\max}^{*nciclos}$. 508

Figura 514. Familia de curvas correspondientes a n entre 1 y 3, en tiempos de proceso “bajos”. 509

Figura 515. Zona de paralelismo de la Figura 512. 510

Figura 516. Zona de paralelismo de la Figura 512 con n entre 1 y 7, con las coordenadas de los puntos correspondientes a 0,9-0,99 $\left\langle A_{\max}^{*nciclos}\right\rangle_m$. 511

Figura 517. Zona de paralelismo de la Figura 512 con n entre 7 y 14, con las coordenadas de los puntos correspondientes a 0,9-0,99 $\left\langle A_{\max}^{*nciclos}\right\rangle_m$. 511

Figura 518. Fragmentos de las curvas entre los puntos de intersección. 512

Figura 519. Recorte de los fragmentos de curva en la zona límite, ... 513

Figura 520. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso hasta 80 s. 514

Figura 521. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 80 - 130 s.. 515

Figura 522. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 130 - 180 s.. 515

Figura 523. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 180 - 235 s.. 516

Figura 524. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 230 - 250 s. 516

Figura 525. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 250 - 280 s.. 517

Figura 526. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 280 - 310 s.. 517

Figura 527. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 310 - 340 s.. 518

Figura 528. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 340 – 370 s. 518

Figura 529. Curvas extremas de la zona límite indicando los puntos de corte de los fragmentos. 520

Figura 530. Recta de aproximación a los puntos de corte de la familia de curvas $A_{\max}^{*nciclos}$ para distintos valores de n. 522

Figura 531. Representación conjunta de la ec [37] (ecuación matemática), y de los tramos según la 523

Figura 532. Estudio comparativo entre los dos métodos. 524

Figura 533. Determinación de la amplificación de la señal y del número de ciclos para un tiempo de proceso de 250 s. 526

Figura 534. Tiempo de proceso necesario para una amplificación de la señal de 10. . 527

Figura 535. Ejemplo de cálculo. 527

Figura 536. Ciclo de un periodo de irradiación y un periodo de medida considerando un tiempo de desplazamiento de la muestra d. 528

Figura 537. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=0. 531

Figura 538. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=0,5 s. 532

Figura 539. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=1 s. 533

Figura 540. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=1,5 s. 534

Figura 541. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=2 s. 535

Figura 542. Rectas de aproximación, incluyendo el punto 0,0. 536

Figura 543.Rectas de aproximación, excluyendo en la nube de puntos el binomio 0,0. 537

Figura 544. Correlación entre las pendientes y las ordenadas en el origen según el tiempo de desplazamiento d. 538

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Límites de detección estimados para las técnicas INAA usando rayos gamma. Se asume una irradiación en un flujo de neutrones de 1x1013 n.cm-2.s-1.[82]. 11
Tabla 2. Límites de determinación del análisis por activación neutrónica en comparación con otros métodos. 13
Tabla 3. Datos generales del F. 20
Tabla 4. Propiedades atómicas del F. 20
Tabla 5. Propiedades físicas. 20
Tabla 6. Otros datos del F. 20
Tabla 7. Isótopos estables del F. 20
Tabla 8. Isótopos del flúor. 21
Tabla 9. Descripción de los modos de decaimiento radiactivo. 35
Tabla 10. Decaimiento α del 235U. 38
Tabla 11. Decaimiento β- del.60Co. 40
Tabla 12. Decaimiento del 65Zn. 42
Tabla 13. Decaimiento del 58 Co. 44
Tabla 14. Emisión β+ del decaimiento del 58Co. 44
Tabla 15. Emisión de electrones del decaimiento del 58Co. 44
Tabla 16. Emisión Gamma y de Rayos X en el decaimiento del 58 Co. 45
Tabla 17.Decaimiento del 60Co. 46
Tabla 18. Emisión de Gamma y de Rayos X en el decaimiento del 60Co. 46
Tabla 19. Decaimiento del 35S. 50
Tabla 20. Emisión β- del 35S. 50
Tabla 21. Decaimiento del 28Al. 51
Tabla 22. Emisión β- del decaimiento del 28Al. 51
Tabla 23. Emisión γ y Radiación X del decaimiento del 28Al. 51
Tabla 24. Decaimiento del 46mSc. 52
Tabla 25. Emisión de electrones de 46mSc. 53
Tabla 26. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del 46mSc. 53
Tabla 27. Decaimiento del 46Sc. 54
Tabla 28. Emisión β- del decaimiento del 46Sc. 54
Tabla 29. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del 46Sc. 54
Tabla 30. Decaimiento del 65Zn. 55
Tabla 31. Emisión β- del decaimiento del 65Zn. 55
Tabla 32. Emisión de electrones de 65Zn. 56
Tabla 33. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del 65Zn. 56
Tabla 34. Desintegración del 60Co. 59
Tabla 35. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del 60Co. 60

Tabla 36. Valores Q, energía umbral y del neutrón a Tª=0º, para la reacción D-T- 75
Tabla 37. Producción de neutrones en fuentes isotópicas..... 80
Tabla 38. Relación entre el ruido, la capacidad de entrada, y la resolución del detector. 93
Tabla 39. Ganancia de un ADC para una resolución de 8192 canales..... 100
Tabla 40. Leyes medias de los minerales de fluorita. 119
Tabla 41. Isótopos del flúor..... 123
Tabla 42. Resumen de las reacciones del flúor con los neutrones. 128
Tabla 43. Características de decaimiento del 19O..... 129
Tabla 44. . Energía β de decaimiento del 19O. 129
. Tabla 45. Energía de radiación γ y X producida en el decaimiento del 19O..... 129
Tabla 46. Energía de los rayos gamma de captura de la reacción 9F19(n,g)9F20. 132
Tabla 47. Características de decaimiento del 16N..... 133
Tabla 48. Energía β de decaimiento del 16N 133
Tabla 49. Energía de radiación γ y X producida en el decaimiento del 16N. 134
Tabla 50. Energía β producida por el decaimiento del 16N. 136
Tabla 51. Rayos X y γ producidos por el decaimiento del 16N. 137
Tabla 52 Isótopos del Calcio. 145
Tabla 53. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del calcio con los neutrones. 150
Tabla 54. Características de decaimiento del 18-AR-37..... 150
Tabla 55. Energía de los electrones en el decaimiento del 18-AR-37. 151
Tabla 56. Energía de la radiación γ y X del decaimiento del 18-AR-37. 151
Tabla 57. Características de decaimiento del 19-K-40..... 151
Tabla 58. Energía de la emisión β en el decaimiento del 19-K-40. 151
Tabla 59Energía de la emisión de electrones en el decaimiento del 19-K-40. 151
Tabla 60. Energía de la emisión X y γ en el decaimiento del 19-K-40 152
Tabla 61. Características de decaimiento del 19-K-40..... 152
Tabla 62. Energía de la emisión β en el decaimiento del 19-K-40. 152
Tabla 63. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 44Ca con los neutrones. 155
Tabla 64 Isótopos del silicio..... 155
Tabla 65. Resumen de las reacciones del 28Si con los neutrones. 159
Tabla 66. Características de decaimiento del 13Al28 160
Tabla 67. Tabla 68. Energía de la emisión β en el decaimiento del 13Al28 160
Tabla 69. Energía de la emisión γ en el decaimiento del 13Al28. 160
Tabla 70. Resumen de las reacciones de interés de 29Si. 164
Tabla 71. Características de decaimiento del 13Al29 164
Tabla 72. Energía de la emisión β del 13Al29. 164
Tabla 73. Energía de la emisión γ del 13Al29.. 164

Tabla 74. Características de decaimiento del 12Mg27. 168
Tabla 75. Energía de la emisión β del 12Mg27. 168
Tabla 76. Energía de la emisión γ del 12Mg27.. 168
Tabla 77. Isótopos del S. 169
Tabla 78. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 32Si con los neutrones. 171
Tabla 79. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 34Si con los neutrones. 174
Tabla 80. Características de decaimiento del 14-Si-31. 174
Tabla 81. Energía de la emisión β del 14-Si-31 174
Tabla 82. Energía de la emisión γ y Xdel 14-Si-31 175
Tabla 83. Isótopos del Ba. 175
Tabla 84. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 134Ba con los neutrones. 181
Tabla 85. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 135 con los neutrones. 186
Tabla 86. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 136Ba con los neutrones. 192
Tabla 87. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 137Ba con los neutrones. 197
Tabla 88. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 138Ba con los neutrones. 203
Tabla 89. Características de decaimiento del 56-Ba-139. 204
Tabla 90. Emisión β del decaimiento del 56Ba139. 204
Tabla 91. Emisión de electrones del 56Ba139. 204
Tabla 92. Energía de la emisión γ y X del decaimiento del 56Ba139. 205
Tabla 93. Isótopos del hierro. 206
Tabla 94. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 26Fe54 con los neutrones. 211
Tabla 95. Decaimiento del 24Cr51. 211
Tabla 96. Emisión de electrones del decaimiento del 24Cr51. 211
Tabla 97. Emisión X y γ del 24Cr51. 211
Tabla 98. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 54Fe con los neutrones. 218
Tabla 99. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 56Fe con los neutrones. 224
Tabla 100. Decaimiento del 26Fe55. 224
Tabla 101. Emisión de electrones del 26-Fe55 224
Tabla 102. Emisión X y γ del 26Fe55. 225
Tabla 103. Decaimiento del 25Mn56. 225
Tabla 104. Emisión β de decaimiento del 25Mn56. 225
Tabla 105. Emisión X y γ de 25Mn56. 226

Tabla 106. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 57Fe con los neutrones. 229
Tabla 107 Isótopos del fósforo 229
Tabla 108. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 31P con los neutrones. 237
Tabla 109. Modo 1 de decaimiento del 11Na24 237
Tabla 110. Emisión β del 11Na24 237
Tabla 111. Modo 2 de decaimiento del 11Na24 237
Tabla 112. Emisión β del modo 2 del 11Na24. 238
Tabla 113. Emisión γ y X del 11Na24. 238
Tabla 114. Características de decaimiento del 13Al28. 238
Tabla 115. Emsión β del 13Al28. 238
Tabla 116. Emisión X y γ del 13 Al 28. 238
Tabla 117. Decaimiento del 14-Si-31. 239
Tabla 118. Emisión β del 14Si31. 239
Tabla 119. Emisión X y γ del 14Si31 239
Tabla 120. Isótopos del Mg. 239
Tabla 121. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 24Mg con los neutrones. 243
Tabla 122. Modo 1 de decaimiento del 11 Na 24 244
Tabla 123. Emisión β del modo 1 de decaimiento del 11 Na 24 244
Tabla 124. Modo 2 de decaimiento del 11 Na 24 244
Tabla 125. Emisión β del segundo modo de decaimiento del 11 Na 24 244
Tabla 126. Emisión X y γ del segundo modo de decaimiento del 11 Na 24. 245
Tabla 127. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 25Mg con los neutrones. 248
Tabla 128. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 26Mg con los neutrones. 251
Tabla 129. Características de decaimiento del 12 Mg 27. 252
Tabla 130. Emisión β del 12Mg27 252
Tabla 131. Emisión X y γ del 12Mg27. 252
Tabla 132. Isótopos del arsénico. 253
Tabla 133. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del arsénico con los neutrones. 257
Tabla 134. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76. 257
Tabla 135. Energía de la emisión β de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76 258
Tabla 136. Emisión X y γ de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76 259
Tabla 137. Modo 1 de decaimiento del 7231Ga. 261
Tabla 138. Energía de la emisión β de 33-AS-75(n,α)31-GA-72. 261
Tabla 139. Energía de los electrones en la reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72 262
Tabla 140. Energía de emisión γ y X de la reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72 263

Tabla 141. Modo 1 de decaimiento del 7532 Ge. 264
Tabla 142. Emisión β- del modo 1 de decaimiento del 7532 Ge 264
Tabla 143. Emisión γ y X del modo 1 de decaimiento del 7532 Ge. 264
Tabla 144. Modo 2 de decaimiento del 7532 Ge 264
Tabla 145. Energía de la emisión de electrones del modo 2 de decaimiento del7532 Ge. 265
Tabla 146. Energía de la emisión X y γ del 7532 Ge. 265
Tabla 147. Modo 3 de decaimiento del 7532 Ge. 265
Tabla 148. Energía de la emisión β del modo 3 de decaimiento del 7532 Ge. 265
Tabla 149. Emisión γ del modo 3 de decaimiento del 7532 Ge. 266
Tabla 150. Isótopos del Hg. 268
Tabla 151. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 198Hg con los neutrones. 270
Tabla 152. Características de decaimiento del 80Hg199. 271
Tabla 153. Emisión de electrones del 80Hg199. 271
Tabla 154. Emisión X y γ de 80Hg199. 272
Tabla 155. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 204Hg con los neutrones. 281
Tabla 156. Características de decaimiento del 80Hg203. 281
Tabla 157. Emisión β de decaimiento del 80Hg203. 281
Tabla 158. Emisión de electrones del 80Hg203. 281
Tabla 159. Emisión Gamma y X. del 80Hg203 282
Tabla 160. Isótopos del Oxígeno. 282
Tabla 161. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 16O con los neutrones. 299
Tabla 162. Isótopos del Hidrógeno. 299
Tabla 163.Cuadro resumen de los productos de las reacciones de la fluorita con los neutrones, y sus características de decaimiento. 305
Tabla 164. Porcentaje de saturación del 16N en función del tiempo de irradiación. .. 312
Tabla 165. Parámetros de ajuste del equipo de detección y registro de la radiación. . 338
Tabla 166. Características de la fuente de calibración de Cesio 137. 340
Tabla 167. Características de la fuente de calibración de Cobalto 60. 340
Tabla 168. Parámetros de calibración canales – energía. 341
Tabla 169. Contenido en F2Ca de las primeras muestras. 343
Tabla 170. Segundo conjunto de muestras. 343
Tabla 171. Granulometría del segundo conjunto de muestras. 344
Tabla 172. Tercer conjunto de muestras. 344
Tabla 173. Lecturas de fondo y activadas con el primer prototipo y con el detector en la posición de diseño. 363
Tabla 174.Influencia de la distancia fuente detector con el prototipo 1. Lectura de fondo. 366

Tabla 175. Relación muestra activada/fondo en el primer prototipo. Tiempo de lectura 180 s, rango de energía amplio. 368

Tabla 176. Relación muestra activada/fondo en el primer prototipo, con tiempo de lectura de 30 s. Rango energía amplio. 368

Tabla 177. Relación muestra activada/fondo con tiempo de lectura de 25 s y rango de energías ancho. 370

Tabla 178. Relación muestra activada/fondo, tiempo de lectura 30 s y rango de energías estrecho. 370

Tabla 179. Relación de lectura/fondo con tiempo de lectura de 25 s y rango de energías estrecho 370

Tabla 180. División en fracciones del intervalo de energías. 372

Tabla 181. Medidas de fondo con blindajes adicionales y medida de una muestra activada. 373

Tabla 182. Medidas de fondo con el detector con blindajes adicionales. 377

Tabla 183. Medidas de la muestra de alta ley activada y del fondo con el primer prototipo modificado. 377

Tabla 184. Medidas de la muestra de baja ley activada y del fondo con el primer prototipo modificado 378

Tabla 185. Lecturas realizadas con el primer conjunto de muestras y analizadas con el segundo prototipo. 385

Tabla 186. Influencia del grado de compactación. 386

Tabla 187. Influencia del tiempo de activación. 387

Tabla 188. Influencia del peso y de la altura de la muestra. 387

Tabla 189. Influencia del peso en muestras de ley en F2Ca de 4,20%. 388

Tabla 190. Influencia del peso en muestras de ley en F2Ca de 27,85%. 389

Tabla 191. Influencia del peso en muestras de ley en F2Ca de 36,75%. 390

Tabla 192. Influencia del peso en muestras de ley en F2Ca de 74,33%. 391

Tabla 193. Medidas de la Tabla 188 referidas a otros intervalos de energía. 391

Tabla 194. Coeficiente de correlación R2 para distintos intervalos de energía. 392

Tabla 195. Lecturas realizadas con el segundo conjunto de muestras y analizadas con el segundo prototipo. 392

Tabla 196. Lecturas de las nuevas muestras. 393

Tabla 197. Influencia de la humedad. 393

Tabla 198. Influencia del tamaño de grano de la muestra. 394

Tabla 199. Muestras en capas de distintas concentraciones. 394

Tabla 200. Influencia de la granulometría en muestras de ley en F2Ca de 33,53%. ... 396

Tabla 201. Distribución de la energía de las partículas α procedentes de la desintegración del 241Am. 407

Tabla 202. Producción de rayos γ al incidir partículas α de distintas energías en un objetivo espeso de Berilio. 407

Tabla 203. Coeficientes de regresión lineal de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía. 411

Tabla 204. Coeficientes de regresión logarítmica de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía.. 412

Tabla 205. Coeficientes de regresión polinomial de segungo grado de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía..... 412

Tabla 206. Coeficientes de regresión polinomial de tercer grado de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía..... 413

Tabla 207. Coeficientes de regresión potencial de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía.. 413

Tabla 208. Coeficientes de regresión exponencial de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía.. 414

Tabla 209. Función que obtiene los mejores coeficientes de regresión de los valores de las cuentas según la ley para el intervalo 4,5 – 6 MeV.. 414

Tabla 210.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando los valores medios del intervalo de energía entre 4,5 y 6 MeV. 427

Tabla 211.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando los valores medios del intervalo de energía entre 4,5 y 6,5 MeV..... 427

Tabla 212. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. Número de iteración 1..... 428

Tabla 213. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Número de iteración 1..... 428

Tabla 214. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Número de iteración 1. 428

Tabla 215. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Número de iteración 1. 429

Tabla 216. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. Número de iteración 2..... 429

Tabla 217. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Número de iteración 2..... 430

Tabla 218. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Número de iteración 2. 430

Tabla 219. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Número de iteración 2. 430

Tabla 220. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Historial de iteraciones. 431

Tabla 221. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimaciones de los parámetros..... 431

Tabla 222. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros..... 431

Tabla 223. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA .. 432

Tabla 224. Datos de partida y valores predichos por el primer modelo para los valores medios en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV..... 434

Tabla 225.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando todos los valores del intervalo de energía entre 4,5 y 6 MeV. 435

Tabla 226.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando todos los valores del intervalo de energía entre 4,5 y 6,5 MeV. 435

Tabla 227. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. 435

Tabla 228. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. 436

Tabla 229. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros..... 436

Tabla 230. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA.. 436

Tabla 231. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Historial de iteraciones. 437

Tabla 232. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimaciones de los parámetros. 437

Tabla 233. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. 437

Tabla 234. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA 438

Tabla 235. Datos de partida y valores predichos por el primer modelo para los todos los valores en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV..... 442

Tabla 236. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. Primera iteración. 445

Tabla 237. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Primera iteración. 446

Tabla 238. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Primera iteración. 446

Tabla 239. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Primera iteración. 446

Tabla 240. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. 2ª iteración. 447

Tabla 241. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Segunda iteración. 447

Tabla 242. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Segunda iteración. 447

Tabla 243. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Segunda iteración. 448

Tabla 244. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Historial de iteraciones. 448

Tabla 245. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimación de los parámetros. 449

Tabla 246. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. 449

Tabla 247. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA. 449

Tabla 248. Datos de partida y valores predichos por el segundo modelo para los valores medios en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV..... 451

Tabla 249. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. 452

Tabla 250. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros..... 452

Tabla 251. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros..... 453

Tabla 252. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA.. 453

Tabla 253. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimaciones de los parámetros. 454

Tabla 254. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. 454

Tabla 255. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA 454

Tabla 256. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA 455

Tabla 257. Datos de partida y valores predichos por el segundo modelo para todos los valores en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV..... 459

Tabla 258. Resumen de los parámetros de los modelos 1 y 2..... 462

Tabla 259. Valores de $\frac{\mu}{\rho}$ (donde ρ es la densidad) para distintos elementos. [112]. 464

Tabla 260. Comparativa entre análisis químico y activación neutrónica para las muestras utilizadas en la elaboración del modelo. 470

Tabla 261. Diferencia entre los valores predichos según el modelo 1 para las primeras muestras no usadas en la deducción del modelo. 471

Tabla 262. Diferencia entre los valores predichos según el modelo 1 para las segundas muestras de leyes y masas dispares. 472

Tabla 263. Relación entre la vida media y el porcentaje de saturación. 479

Tabla 264. Estimación de los valores alcanzados por A ante muestras de diferente ley y ante el fondo. 486

Tabla 265. Ciclos múltiples para tiempo de proceso total de 120 s. 491

Tabla 266. Valores de $A_{\max}^{*nciclos}$ según T y n. 493

Tabla 267. Valores de la magnitud máxima leída ajustada al número natural de ciclos más cercano al óptimo para cada tiempo de proceso. 496

Tabla 268. Valores de G para distintos T y n. 497

Tabla 269. Número de ciclo óptimo y ganancia relativa G en la señal detectada, para distintos tiempos de proceso. 500

Tabla 270. Número de ciclos y tiempos de activación óptimo para varios tiempos de proceso. 500

Tabla 271. Valores de T para n igual a 1 y 2 a través de la resolución gráfica de la ec. [35] 504

Tabla 272. Valores de tiempos de proceso T para n_{op} entre 1 y 13 ciclos, por medio de la ec. [37]. 506

Tabla 273. Número de ciclos para distintos tiempos de proceso por el método de los puntos de corte en la zona límite. 521

Tabla 274. Determinación del tiempo del ciclo. 523

INDICE DE ANEXOS:

Anexo I. Relación de archivos de datos obtenidos en el laboratorio.

Anexo II. Patente Solicitada.

Anexo III. Protección contra la radiación.

Anexo IV. Secciones eficaces.

1. Introducción.

El objeto de la presente tesis es la de:

- analizar la viabilidad para la realización de los análisis en laboratorio por métodos de activación neutrónica, de los minerales de flúor procedentes de muestras de fluorita tomadas en distintos puntos de una planta de concentrado de fluorita,
- realizar los ensayos de laboratorio. Para ello se diseñaron y se fabricaron diversos prototipos,
- extraer conclusiones y
- finalmente proponer un método industrial para llevar a cabo el análisis.

Si bien el fundamento teórico del método de análisis por activación neutrónica es conocido, ha sido necesario establecer todos los parámetros necesarios para llevarlo a cabo en laboratorio de manera fiable, precisa y segura a partir de una muestra de mineral de fluorita.

Para este estudio de viabilidad se ha utilizado el material disponible facilitado por profesores del área de **Energía Nuclear del Departamento de Energía** de la Universidad de Oviedo. Este material ha sido fundamental en el desarrollo del proyecto, si bien en ocasiones no ha sido el más idóneo para la función buscada.

Se ha contado con el apoyo incondicional de la empresa minera **Minerales y Productos Derivados, S.A**. (MINERSA), que ha tenido un papel importante en el diseño y desarrollo de los prototipos fabricados.

En una primera instancia, se ha dispuesto de la ayuda institucional de la Universidad de Oviedo en la **Convocatoria de Ayudas de la Universidad de Oviedo para Proyectos de Investigación** (Modalidad A) para el año 2006.

Una vez alcanzados los primeros resultados, se ha solicitado y se ha concedido una subvención dentro de la Convocatoria Pública de Ayudas para la ejecución de **Proyectos de Investigación Concertada en el marco del PCTI de Asturias 2006-2009**. (Resolución de fecha 3 de marzo del 2006).

Con esta subvención se pretende adquirir el equipo más idóneo para llevar a cabo los análisis, según los resultados obtenidos hasta la fecha y se desarrolla en colaboración con la empresa Minerales y Productos Derivados, S.A.

Como resultado de los trabajos que culminan en esta Tesis Doctoral, se ha solicitado una Patente de Invención, que tiene por título:"**Método y aparato para análisis de la flúor a partir de muestras minerales o compuestos de flúor, por el método de activación neutrónica**", cuyo nº de solicitud es P200601199 y la fecha de solicitud es 03/05/06.

La fluorita es la principal fuente para obtener flúor. Hoy en día existen otros yacimientos para la obtención del flúor, como son los de criolita y fluorapatito, si bien quedan muy pocos.

En Asturias la minería de la fluorita es muy antigua, y existen plantas de concentración de la misma de la empresa MINERSA en Ribadesella, que han colaborado estrechamente en esta investigación.

El método de análisis utilizado es el de activación neutrónica, que si bien es conocido y ampliamente utilizado en otros países con distintos fines, no se utiliza en España, y por supuesto, no se emplea en la minería y concentración de la fluorita.

El análisis por activación neutrónica (NNA) es una técnica analítica de precisión, útil para realizar análisis multi-elemental cuantitativo y cualitativo de elementos traza, mayoritarios, y minoritarios, en muestras de casi todos los campos de interés científico o técnico.

Para muchas aplicaciones y elementos, el método NNA ofrece sensibilidades que son superiores a aquellas obtenibles por otros métodos, del orden de partes por billón.

A causa de su exactitud y de su confiabilidad, se reconoce generalmente el método NNA como el "método árbitro" de calidad, cuando se desarrollan procedimientos nuevos, o cuando otros métodos dan resultados heterogéneos. Las aplicaciones de NAA a lo largo del mundo están ampliamente extendidas y se estiman que aproximadamente 100.000 muestras se analizan por este método cada año.

El análisis por activación neutrónica fue descubierto en 1936 cuando se observó que muestras que contenían ciertos elementos raros se convertían en elementos altamente radiactivos después de exponerlas a una fuente de neutrones.

A partir de esta observación, se reconoció rápidamente el potencial de empleo de las reacciones nucleares para el análisis de muestras seguido de la medida de la radiactividad inducida para facilitar tanto la identificación cuantitativa como la cualitativa de los elementos presentes en las muestras.

Los elementos básicos requeridos para llevar a cabo un análisis de muestras por el método NAA son una fuente de neutrones, instrumentación adaptada para detectar rayos gamma, y un conocimiento detallado de las reacciones que ocurren cuando los neutrones interactúan con el núcleo objetivo.

De los resultados obtenidos, se concluye que el análisis por activación neutrónica de la fluorita ofrece un método que combina importantes propiedades:

- Rapidez (la medida se obtiene en pocos minutos) lo que contrasta con los métodos de análisis químico convencional utilizados actualmente y que suponen utilizar 20 horas o algo así
- Ninguna necesidad de preparación de la muestra lo que facilita su uso como variable del proceso.
- Precisión (los métodos de activación neutrónica se utilizan como método de referencia para validar otros procedimientos de medida).

Es importante destacar que en la tesis se ha estudiado la viabilidad del método para los análisis en laboratorio de muestras de fluorita procedentes de distintos puntos del lavadero y se han abierto

varias vías de investigación que apuntan hacia una aplicación más extensa de este procedimiento,

- para analizar muestras de diferentes granulometrías,
- para medir directamente el mineral en una cinta transportadora,
- para analizar el mineral en el camión,
- in situ, en la mina o
- en sondeos.

1.1. Algunas entidades y organizaciones que realizan análisis por activación neutrónica.

Hasta el momento, es posible encontrar laboratorios que dispongan de un reactor nuclear de investigación o fuentes radiactivas específicas, y que realizan análisis por activación neutrónica.

En este pequeño resumen, se muestran distintas universidades, aunque en su mayoría, trabajan con reactores nucleares de investigación para producir neutrones, y analizan muestras enviadas desde distintos puntos del país para control de análisis realizados por otros métodos. El análisis propuesto reduciría considerablemente los precios y los tiempos para su realización, ya que se realizarían en la misma planta.

[1] El Imperial College tiene, en Silwood Park, el *Analytical Services Group* que está formado por un equipo que proporciona un servicio comercial para el análisis por activación neutrónica de una amplia gama de materiales.

[2] En la Universidad de McMaster, en Canadá, el Centre *for Neutron Activation Analysis* CNAA se creó para proporcionar a la comunidad investigadora un servicio centralizado para desarrollar trabajos de investigación. También en Alberta, se dispone de un reactor nuclear SLOWPOKE-II, que tiene entre otros fines el del NAA.

[3] El Elemental Analysis Laboratory en Texas A & M University posee un laboratorio que proporciona soporte para la investigación de análisis de elementos traza con técnica de activación neutrónica. También la Universidad de Texas en Austin irradia muestras con un reactor Triga y se compara la radiactividad inducida con la estándar. Otras muchas universidades estadounidenses tienen servicios similares, como las de Berkeley, Kansas, Ohio, North Caroline, California, Michigan, ...

[4] US Geological Survey dispone del grupo CACS Analytical Services Group que en la actualidad acepta trabajos de análisis del exterior. Entre sus ofertas, se incluye, entre otras, las técnicas de activación neutrónica.

[5] En Holanda, la Universidad de Delft dispone de un reactor que utilizan en ensayos tipo NAA

[6] Universidad de Mainz, en Alemania, dispone de un reactor de investigación para investigación básica y aplicada, con un

programa de investigación en DNAA, si bien no han trabajado con muestras de fluorita.

1.2. Algunas aplicaciones del análisis por activación neutrónica.

El análisis por activación neutrónica se está utilizando hoy en día en multitud de proyectos de investigación, relacionados con los distintos campos:

a. ***Arqueología:*** el uso de AAN para caracterizar especimenes arqueológicos (Ej.: cerámica, obsidiana, caliza y basalto) es una aplicación bien establecida del método. Durante la década pasada, grandes bases de datos de huellas químicas de arcillas, obsidiana y basalto se han acumulado a través de análisis aproximadamente 30 elementos en cada uno de más de 42000 especimenes. La combinación de estas bases de datos con convincentes métodos estadísticos multivariables permite a algunos materiales arqueológicos ser datados con un alto grado de confianza. La información suministrada puede ayudar a los arqueólogos a reconstruir los habitas de las poblaciones prehistóricas. Por ejemplo las "huellas" de piezas de obsidiana por AAN es un método 100% acertado para determinar rutas de comercio prehistórico.

b. ***Minería. Estudios medioambientales relacionados con la minería del Uranio*:** en los diez años entre 1948 y 1958 la minería de Uranio extraía en USA entre 38000 toneladas y 5,2 millones de toneladas implicando más de 400 minas. De estas actividades se ha producido contaminación de una gran superficie y sus correspondientes aguas subterráneas, con Uranio-238, Torio-232 y sus hijos radiactivos. El análisis por activación neutrónica de las distintas muestras ha permitido automatizar el proceso de análisis de muestras y monitorizar la contaminación.

c. ***Industria.*** Determinación en diversas industrias de trazas de materiales peligrosos tanto orgánicos como diclorobenceno, naftaleno, etc. o elementos pesados como el cadmio, el plutonio, el mercurio, el torio, el uranio, etc

d. ***Medicina.*** En medicina se aplica extensivamente el análisis por activación neutrónica*:*

Radioindicadores in-situ para verificar la forma-dosificación: sobre los últimos años ha tenido un creciente interés en el uso de *radioindicadores in-situ* para verificar medicinas y formas de dosificación siendo desarrolladas para distribución comercial.

Epidemiología nutricional – indicadores de cáncer genético/ nutricional y bioquímico.

e. ***Bioquímica.*** *Estudio metabolismo Calcio.*

f. ***Ciencia geológica:*** el análisis de rocas por AAN asiste a los estudios geoquímicos en la investigación sobre el proceso de

la formación de diferentes rocas a través del análisis de elementos de tierras raras (REE) y otros elementos traza, y para modelar procesos geoquímicos. Por ejemplo; el descubrimiento de altas concentraciones anómalas de Iridio en depósitos de caliza de Italia y Dinamarca de hace 65 millones de años solamente podría haber sido llevado a cabo por AAN. Los hallazgos AAN apoyan la teoría que la extinción de los dinosaurios ocurrió después del impacto de un gran meteorito contra la Tierra.

g. ***Electrónica. Materiales semiconductores y otros materiales de elevada pureza***: (AAN) se usa para medir elementos traza y ultratrazas de impurezas y venenos en semiconductores y otros materiales de elevada pureza.

h. ***Producción agrícola:*** algunos procesos de agricultura y sus consecuencias, tales como fertilización y herbicidas y controles pesticidas, son influenciados por actuaciones sobre la superficie y sobre el subsuelo. Indicadores radiactivos estables, tales como Bromuros, analizados por AAN, han permitido a la agricultura cuantificar la distribución de elementos químicos agrícolas bajo una amplia variedad de influencias medioambientales y usos de tierra.

i. ***Estudios medioambientales relacionados con la agricultura.*** Los ecosistemas de agua fresca de California han sido excesivamente contaminadas con Selenio como un resultado de irrigación o desvío en gran escala áreas agrícolas usadas. El efecto ha sido observado a lo largo de la mayor parte de la cadena alimenticia. El objetivo de estos estudios es evaluar la extensión de la contaminación y evaluar metodologías que podrían ser eficaces en la reducción de Selenio en estos ecosistemas.

2. Metodología general.

a. Enfoque hacia una posible solución

Con los conocimientos y las experiencias previas del equipo investigador se van eliminando algunas técnicas. Después de algunas pequeñas consultas bibliográficas aparece como principal técnica candidata a desarrollar la técnica de activación neutrónica.

b. Planteamiento del problema

Se comienza con el objetivo general de encontrar un dispositivo que fuera adecuado para medir la concentración de flúor en la fluorita y que cumpliese como requisito más importante que el tiempo de medida fuese lo más breve posible.

c. Búsqueda bibliográfica

Realizar una búsqueda bibliográfica intensa incluyendo en esta búsqueda las patentes que pudieran existir sobre el tema. En este capítulo se resalta la existencia de una patente que se ha tenido en mente como referencia.

También se resalta la existencia de redes de bases de datos nucleares. Estas bases de datos contenienen una abundante información.

d. Análisis fisico-matemáticos previos.

En un primer análisis físico-matemático previo se valora la posibilidad de uso de los materiales con los que se cuenta. Fuente de neutrones disponible y equipo de medida.

e. **Análisis teóricos de las reacciones** que pueden tener importancia en el desarrollo de la investigación. Para realizar estos análisis se ha utilizado muy intensamente los datos contenidos en las distintas bases de datos de información nuclear.

f. Diseño del equipo con el que se van a realizar las medidas.

El diseño del equipo se realiza utilizando los datos de los que se dispone en el momento inicial, se hace un especial hincapié en el tema de la seguridad.

Toma de las primeras medidas análisis de las mismas conclusiones y modificación del equipo. Al realizar las primeras medidas se obtienen resultados que permiten afinar el diseño inical del equipo.

g. **Nuevo diseño** para resolver los problemas observados en el paso anterior.

Repetición de las medidas análisis conclusiones y modificación del diseño hasta obtener el diseño definitivo con el cual se han obtenido los resultados.

h. Análisis de estos resultados.

El proceso de análisis de los resultados se apoya en la ciencia estadística teniendo en cuenta los parámetros que tienen una influencia observable.

3. Estado actual de los conocimientos científicos y técnicos.

En este capítulo se realiza un repaso a las técnicas de activación neutrónica, a los métodos de análisis del flúor, a los fundamentos teóricos de las reacciones nucleares.

3.1. Técnicas de activación neutrónica.

La activación neutrónica consiste en la irradiación de un núcleo con neutrones, para producir una especie radiactiva, conocida normalmente como radionucleído.

El número de radionucleídos producidos, dependerá del número de núcleos objetivo, del número de neutrones, y de un factor conocido como sección eficaz, que define la probabilidad de que se produzca la activación.

Si el producto de la activación es radiactivo, decaerá con una vida media característica. En consecuencia, el aumento de la actividad durante la irradiación, dependerá de la vida media del producto.

La energía de los neutrones que están bombardeando el núcleo, determinará el tipo de interacción que ocurre y, en consecuencia, la naturaleza del producto de la activación. Por eso, si el núcleo se sitúa una muestra en un flujo de neutrones de distintas energías, puede que haya más de un producto de activación.

Igualmente, puede producirse el mismo radionucleído durante la activación de diferentes núcleos objetivo.

Estos fenómenos dan lugar a interferencias de distintos procesos en el estudio de una reacción, y deben analizarse muy exhaustivamente.

En la siguiente figura se ilustra la secuencia de acontecimientos que ocurren durante la mayoría de reacciones nucleares usadas para análisis del tipo NAA.

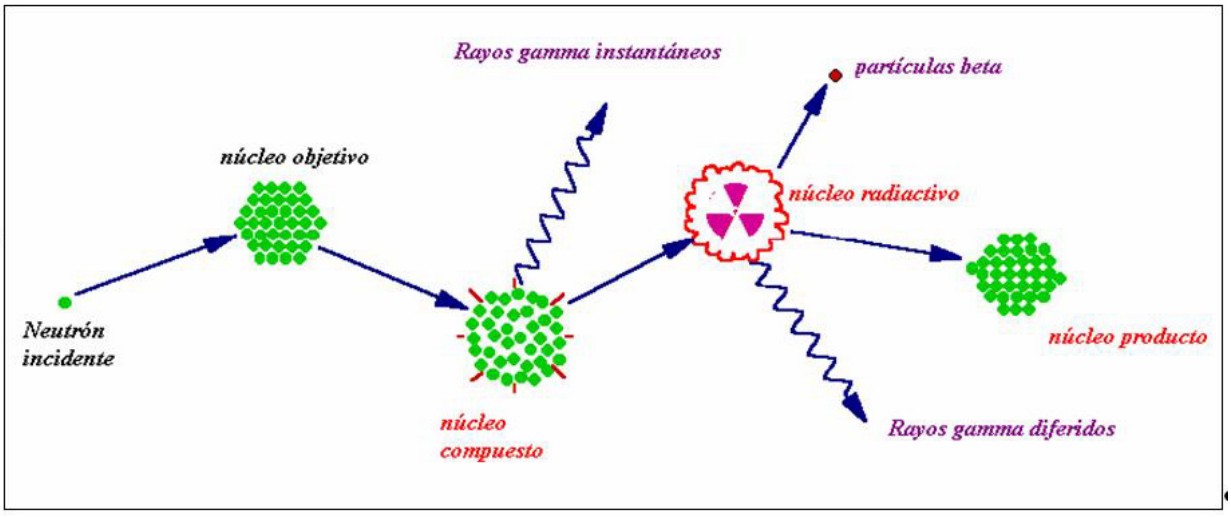


Figura 1. Principio de la activación neutrónica.

Cuando un neutrón interactúa con el núcleo objetivo por medio de una colisión no elástica, el núcleo compuesto adquiere un estado excitado. La energía de excitación del núcleo compuesto se debe a la energía de ligadura del neutrón con el núcleo. El núcleo compuesto se desexcita casi instantáneamente pasando a tener una configuración más estable a través de la emisión de uno o más rayos γ instantáneos característicos.

En muchas ocasiones, esta nueva configuración da lugar a un núcleo radiactivo el cual también se desexcita (o decae) debido a la emisión de uno o más rayos γ diferidos característicos, pero a una velocidad mucho menor de acuerdo con la vida media única del núcleo radiactivo. Dependiendo de las especias radiactivas particulares, la vida media puede oscilar desde fracciones de segundo a varios años.

En principio, por esta razón, con respecto al tiempo de medida de la radiación γ producida, los métodos de activación neutrónica están divididos en dos categorías:

- análisis de activación neutrónica con emisión y detección de "rayos gamma instantáneos" **(PGNAA)**, y donde la medida tiene lugar durante la radiación, o
- análisis de activación neutrónica con emisión y detección de rayos gamma diferidos, **(DGNAA)**, donde las medidas se realizan a través de la emisión radiactiva de decaimiento del elemento radiactivo.

Este modo de operación último es más común, así, cuando uno menciona el método NAA, se asume generalmente, que mide los rayos gamma diferidos. Alrededor del 70% de los elementos tienen propiedades que les permiten ser medidos por el método NAA. En este caso, la muestra a analizar se coloca en un flujo de neutrones, normalmente en un reactor nuclear. Se irradia para activar los elementos de interés y se transfiere a un detector de rayos gamma. Los rayos gamma emitidos por los radio nucleidos se mide en durante un periodo de tiempo. Se usa la espectrometría de rayos gamma para identificar y medir alrededor de 40 elementos simultáneamente.

Como se ha mencionado anteriormente, la técnica NAA se puede desarrollar en dos tipos, de acuerdo con el tiempo de lectura de los rayos gamma producidos: lectura simultánea con el tiempo de irradiación de neutrones (PGNAA), o lectura en algún tiempo después del fin de la irradiación (DGNAA).

[1] La técnica PGNAA se ejecuta generalmente al usar un haz de neutrones extraído a partir de un puerto de rayos de un reactor nuclear de investigación.

Los flujos de neutrones en las muestras irradiadas son del orden de un millón de veces menor que el que habría si se situaran las muestras dentro del reactor, pero los detectores de rayos γ se pueden colocar muy cerca de la muestra, compensando la pérdida de sensibilidad debida al flujo. La técnica PGNAA es la más aplicable cuando los elementos a analizar tengan las siguientes características:

- que posean una sección eficaz de captura de los neutrones extremadamente alta, por ejemplo B, Cd, Sm y Gd. El número de rayos γ instantáneos producido es entonces, muy elevado.

- Elementos con los que no se pueda aplicar la técnica DGNAA, porque:
  - den lugar a elementos radiactivos cuyo decaimiento es demasiado rápido, tanto que no se dispone del tiempo necesario para desplazar la muestra frente a un detector y medir los rayos gamma diferidos, tal como se hace en la técnica DGNAA,
  - Las intensidades de rayos gamma de decaimiento de los elementos radiactivos producidos sean muy débiles.
  - produzcan solamente isótopos estables, y no den lugar a elementos radiactivos de los que se pueda medir su decaimiento.

[2] La técnica DGNAA y a veces llamada convencionalmente NAA es útil en la inmensa mayoría de los elementos que producen nucleídos radiactivos.

La técnica es flexible con respecto al tiempo, de forma que se puede mejorar la sensibilidad de detección de los radionucleídos de larga vida, cuando sufren interferencias por la presencia de radionucleídos de vida más corta, simplemente esperando a que el radionucleído de vida corta decaiga. Esta selectividad es una ventaja clave de las técnicas NAA sobre otros métodos analíticos.

Con el uso de sistemas de manipulación automático de las muestras, de los detectores de rayos gamma de estado sólido, y del ordenador en el procesado de datos, se puede lograr medir simultáneamente más de 30 elementos en la mayoría de los tipos de muestras, sin necesidad de procesado químico. El análisis con métodos puramente instrumentales se llama a veces "Análisis de Activación Neutrónica Instrumental" (INAA), y es una de las más importantes ventajas de las técnicas NAA sobre otras técnicas analíticas.

Si se hacen separaciones químicas a las muestras después de la irradiación con objeto de, o bien, eliminar interferencias o bien concentrar los isótopos de interés, la técnica se llama entonces, "Análisis de Activación Neutrónica Radio Químico" (RNAA). Esta técnica última no se usa un debido al alto coste que supone.

La sensibilidad de las técnicas NAA dependen de

- los parámetros de irradiación (flujo de neutrones, energía de los neutrones, tiempo de irradiación...),
- las condiciones de medida (tiempo de desplazamiento de la muestra, tiempo de medida, eficiencia del detector...),
- parámetros nucleares de los elementos a ser medidos (por ejemplo, abundancia de un determinado isótopo, sección cruzada a los neutrones, vida media, número de rayos gamma...).

La aproximación de una determinación individual NAA según la bibliografía consultada, generalmente varía entre 1 a 10% del valor que se considera. La tabla 1 lista las sensibilidades aproximadas para

determinar los elementos suponiendo un espectro libre de interferencias.

Sensibilidad (picograms)	Elementos
1	Dy, Eu
1 - 10	In, Lu, Mn
10 - 100	Au, Ho, Ir, Re, Sm, W
100 - 1E3	Ag, Ar, As, Br, Cl, Co, Cs, Cu, Er, Ga, Hf, I, La, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, Yb
1E3 - 1E4	Al, Ba, Cd, Ce, Cr, Hg, Kr, Gd, Ge, Mo, Na, Nd, Ni, Os, Pd, Rb, Rh, Ru, Sr, Te, Zn, Zr
1E4 - 1E5	Bi, Ca, K, Mg, P, Pt, Si, Sn, Ti, Tl, Xe, Y
1E5 - 1E6	F, Fe, Nb, Ne
1E7	Pb, S

Tabla 1. Límites de detección estimados para las técnicas INAA usando rayos gamma. Se asume una irradiación en un flujo de neutrones de $1x10^{13}$ $n.cm^{-2}.s^{-1}$.[82].

En ocasiones se hace referencia a la activación neutrónica con el término de "espectrometría de activación", que se define como un análisis de activación neutrónica junto con una espectrometría de rayos gamma. Si bien en el análisis de activación, los neutrones son el medio más común de activación, se pueden utilizar también partículas cargadas para activar elementos más ligeros.

El término análisis de activación neutrónica se refiere normalmente al análisis por medio la espectrometría de rayos gamma, a menos que se especifique una alternativa, tal como es el caso del análisis de neutrones resultantes de las colisiones. Espectrometría de activación, se refiere, entonces, a la activación de un elemento con neutrones, y a la posterior determinación usando espectrometría de rayos gamma.

En general, la forma de la muestra no es importante. Puede ser sólida, líquida, polvo, incluso de gas. Sin embargo, la forma y el tamaño de la muestra afectarán a la actividad específica inducida durante la radiación, y al contaje, y por ello, es importante tenerla en cuenta por los problemas que puede originar. En el rango del tamaño posible de las muestras es una característica propia de la técnica, y los pesos van desde microgramos a cientos de gramos.

La técnica está caracterizada por su precisión, y esta es la razón por la que se usa frecuentemente como una técnica de referencia para el desarrollo de materiales de referencia. La principal limitación de la precisión, se debe a la naturaleza estadística del contaje en el proceso de espectrometría de rayos gamma, y normalmente, es posible mejorar la precisión, utilizando tiempos de contaje largos. El problema se plantea cuando se irradian elementos y se desean detectar a través de la detección de radio nucleidos de vida corta.

La técnica se usa generalmente para análisis de elementos traza, en análisis multi elemental. El límite de la detección es desde el nivel de microgramos para muchos elementos y por debajo de ng para otros. Sin embargo, el límite de detección dependerá de los otros elementos presentes en la matriz.

En la Tabla 2 se hace una lista con los límites de determinación para distintos elementos, según diversos autores, utilizando el análisis por activación neutrónica bajo condiciones ideales, asumiendo un flujo de neutrones **termales** de 10^{18} n $m^{-2}s^{-1}$ durante 3 días.

Los límites de detección se comparan con aquellos obtenidos con otros métodos de análisis multielemental:

Elemento	FAAS[a] (mg/kg)	ICP-AES[b] (mg/kg)	ICP-MS[c] (mg/kg)	INAA[d] (mg/kg)
Ag	2	5	0,16	2
Al	12	9	0,485	100
As	60	15	1,4	1
Au	0,1	10	0,055	0,005
B	90	2	0,19	1
Ba	10	1	0,1	20
Bi	5	20	0,005	-
C	-	70	-	-
Ca	0,6	4	5	200
Cd	2	5	0,285	-
Ce	-	35	0,05	3
Co	5	5	0,17	0,1
Cr	10	3	0,055	0,5
Cs	12	16600	0,045	0,2
Cu	5	5	0,115	-
Fe	5	2,5	0,5	50
Hg	102	10	0,12	-
In	24	25	0,13	0,2
Ir	300	11	0,4	0,005
K	0,6	2400	2	-
La	1200	5	0,04	0,1
Li	3	3	0,15	-
Lu	180	0,4	0,025	0,05
Mg	0,12	12	0,7	-
Mn	5	15	0,15	100
Mo	3	10	0,35	2
Na	0,2	12	1,5	10
Nb	90	5	0,02	-
Nd	3	25	0,10	5
Ni	5	5	2	50
Os	60	0,14	0,22	10
P	24000	30	16	-
Pb	10	20	0,15	-
Pd	9	18	0,21	10
Pr	3000	40	0,05	-
Pt	42	22	0,21	-
Rb	1	15000	0,8	0,1
Re	480	2,4	2	1
Rh	3	18	1	-
Ru	180	12	0,22	-
Sb	5	20	0,14	0,1
Sc	10	2	0,03	0,05
Se	120	50	0,14	0,5
Si	90	5	16,5	-
Sm	600	15	0.1	0,1
Sn	20	6	0,02	-
Sr	1	5	0,5	100
Ta	900	10	0,01	0,03
Tb	600	80	0,02	0,1
Te	30	16	1,5	-
Th	-	-	0,01	0,2
Ti	42	105	1,2	10
Tl	12	16	0,02	-
Tm	60	2	0,01	0,34
U	90	80	0,01	0,1
V	1	5	0,08	1
W	90	50	0,01	1
Y	50	5	0,5	-
Yb	24	1	0,03	0,2
Zn	0,8	5	0,30	10
Zr	90	6	0,06	100

Tabla 2. Límites de determinación del análisis por activación neutrónica en comparación con otros métodos.

- FAAS: acrónimo de "*Flame atomic absorption spectrometry*", [176].
- ICP-AES: acrónimo de "*Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry*", [176]
- ICP – MS: acrónimo de "*Inductively coupled plasma atomic mass spectrometry*", 3 sigma assuming dilution x 500, [110].
- INAA: acrónimo de "*Instrumental thermal neutron activation analysis",* [176].

El método se puede usar para determinar elementos en un amplio rango de concentraciones, ya que la curva de calibración es una línea recta. En teoría, el método se puede usar para medir elementos desde rangos de concentración de ng a gramos. Sin embargo, si el elemento está presente en una concentración demasiado elevada, hay una posibilidad de actúe como blindaje para la interacción de los neutrones con núcleos más alejados, lo cual puede reducir la actividad específica de los radio nucleidos producidos.

Los elementos que dan una actividad de rayos gamma intensa durante la radiación, producirán una fuerte actividad de fondo y posiblemente rayos gama de interferencia.

Algunos elementos no se activan durante la irradiación con neutrones termales para producir rayos gamma, así como por ejemplo, le ocurre al carbono, hidrógeno, y nitrógeno, y oxígeno, que no afectarán al análisis. Por otra parte, el aluminio, el sodio, y el cloro, y se activan muy bien, y causarán serias interferencias que habrá que superar.

El tiempo para el análisis depende de los elementos a medir. Si el elemento se activa y da lugar a nucleidos de vida corta, se puede irradiar y contar en unos pocos minutos. Por otra parte, para analizar algunos elementos necesita que la muestra se irradie durante algunas semanas, y dejados durante meses antes de realizar el contaje que llevará muchas horas. Para radio nucleidos de vida larga, los tiempos son relativamente flexibles y el análisis pueda hacerse tan lejano en el tiempo de la irradiación como sea posible.

Hasta ahora, el coste de los análisis está muy condicionado por el coste de operación de un reactor nuclear de investigación, y depende de los límites de detección requeridos, qué elementos se van a medir y en qué matriz estén encajados.

Sin embargo, los costes comerciales típicos, son competitivos con otras técnicas que proporcionan un rango equivalente de elementos y similares límites de detección.

Como se ha dicho antes, el principal coste proviene del uso de un reactor nuclear. Normalmente, el reactor será construido con otro propósito, tal como investigación y entrenamiento nuclear, pruebas de materiales o producción de isótopos. Los análisis por activación neutrónica son entonces un subproducto útil de una operación con un reactor y entonces, el coste de las irradiaciones se mantiene normalmente en un nivel aceptable.

La espectrometría de activación se puede aplicar a un amplio rango de tipos de muestras incluyendo muestras biomédicas, como sangre, y tejido, cabello, dientes y huesos; muestras medioambientales

tales como filtros de aire, agua, plantas y vegetación; muestras geológicas, incluyendo rocas, minerales y menas; y una variedad de aplicaciones industriales con matrices de carbono y boro, orgánicas, metales y aleaciones, vidrios y cerámicas.

En general, la espectrometría de activación es uno de los métodos más sensibles para análisis multielemental, junto con la espectrometría de emisión de plasma acoplada inductivamente y espectrometría de masas de plasma acoplada inductivamente.

3.1.1. Activación con neutrones.

En una reacción inducida por neutrones, la concentración del elemento producido depende del flujo de neutrones. A mayor flujo de neutrones, mayor es la cantidad de elemento producido o tasa de activación.

Tasa de activación ∞ flujo de neutrones

La tasa de activación, es también directamente proporcional al número de núcleos objetivo presentes.

Tasa de activación ∞ número de núcleos presentes N

El número de núcleos objetivo presentes dependerá de la abundancia isotópica de un isótopo particular de interés. Por ejemplo, el flúor se compone del elemento estable ^{19}F y en consecuencia, todos los núcleos objetivos serán los mismos. Sin embargo, el azufre se compone en un 95,02% de ^{32}S, por lo que la tasa de activación de un elemento producido depende específicamente de la abundancia en particular del ^{32}S.

El número de Avogadro, representa el número total de átomos que existen en el peso atómico A de un elemento. Por eso, el número total de átomos por gramo se obtiene al dividir el número de Avogadro por el peso atómico, A.

$$N = N_A/A$$

Si multiplicamos por la masa w, obtendremos el número total de núcleos objetivo en una masa determinada.

$$N = w\ N_A/A$$

Sin embargo, puede ser que haya más de un isótopo de un elemento, tal como el caso del calcio donde hay 6 isótopos estables. En tal caso, el número de núcleos objetivo debe ser corregido por la abundancia isotópica θ.

$$N = w\ N_A\ \theta/A$$

En consecuencia, el número de núcleos objetivo es proporcional a la masa del elemento presente y así, el aumento de los productos de activación es proporcional al número de núcleos objetivo de donde se deduce que la tasa de activación es proporcional a la masa del elemento.

Tasa de activación ∞ masa del elemento (w)

Por eso, es posible deducir la masa del elemento presente por la actividad inducida. Esto es la base de la técnica de análisis de

activación neutrónica. Si el flujo de neutrones permanece constante, entonces se puede determinar la curva de calibración de un elemento al representar la actividad inducida frente a la masa de elemento.

3.1.2. Sección eficaz.

La relación entre la tasa de activación [eventos s^{-1}], el número de núcleos objetivo *N* [átomos], y el flujo de neutrones φ [$m^{-2}.s^{-1}$], se expresa con el término sección eficaz σ [m^2]. La sección eficaz es, simplemente, una constante física.

$$Tasa\ de\ activación = \sigma.\varphi.\ N \qquad [1]$$

Sustituyendo,

$$Tasa\ de\ activación = \sigma.\varphi.\ w\ N_A\ \theta/A \qquad [2]$$

Las secciones eficaces usualmente se expresan en barn que son 10^{-28} m^2. De una manera tosca, se puede decir que **un núcleo** objetivo **que tenga una sección eficaz de la orden de barns, se activará bien,** pero otro **con una sección eficaz de mbarns,** tendrá una **activación muy pobre**.

Es importante recordar que cada isótopo estable del mismo elemento tendrá diferentes secciones eficaces. En consecuencia, un isótopo puede tener una sección eficaz alta y convertirse de una manera muy activa mientras que otro isótopo del mismo elemento puede tener una sección eficaz pequeña y ser activado en una extensión mucho más pequeña. Por eso, es importante considerar las secciones eficaces cuando decidimos que núcleo objetivo usar en el análisis por activación.

La sección eficaz del neutrón para un núcleo particular dependerá de la energía del neutrón. Muchos núcleos, particularmente los de número atómico bajo, (conocidos como absorbentes 1/v) absorben neutrones termales con secciones eficaces que decrecen linealmente con el aumento de la velocidad del neutrón.

Es normal hacer referencia a secciones eficaces termales para la absorción de neutrones con una velocidad media de 2.200 m/s.

Se disponen de tablas que indican las secciones eficaces por activación con neutrones. En las tablas, las secciones eficaces pueden ser expresadas de diferentes formas, y la sección eficaz total dada para un objetivo particular, se compone de un número de secciones eficaces parciales, dependiendo del proceso de activación, incluyendo reacciones neutrón gamma, neutrón protón y neutrón alfa.

En la mayoría de la activación neutrónica normal, el principal proceso se refiere a la reacción neutrón gamma, que implica una sección eficaz de captura radiactiva del neutrón σ_n.

No todos los núcleos objetivo son absorbentes de neutrones termales, 1/v y hay muchos ejemplos de núcleos los cuales principalmente absorben neutrones epitermales. En estas energías más altas, la sección eficaz de los neutrones se denomina "integral de resonancia" y se usa la integral de resonancia de captura radiactiva I_γ

Los valores de las secciones eficaces de captura y de las integrales de resonancia vienen dados por tablas. Puede verse en estas tablas que las secciones eficaces y las integrales de resonancia de los elementos más ligeros son del mismo orden. Ellos son absorbentes 1/v. Por otra parte los isótopos ^{109} Ag, ^{152}Sm y ^{197} Au tienen integrales de resonancia muy grandes, comparados con las secciones eficaces termales, indicando que ellos tienen fue estas resonancias en la región por encima de la energía de corte del cadmio. En estos casos, que es importante incluir el término integral resonancia en el cálculo de la tasa de activación.

Tasa de activación = σ.φth. N + Iγ φepiN

En esta Tesis la reacción principal que se busca, tal como se justifica en el capítulo 5, el principal proceso se refiere a una reacción neutrón alfa, que se produce con neutrones rápidos, y se analizarán las secciones eficaces de los distintos isótopos de los núcleos objetivo ante los neutrones de dicha energía. Como resultado de esta reacción se produce un elemento que en algunos casos puede ser radiactivo. Se han utilizado los valores de las secciones eficaces extraídos de las bases de datos indicadas en el punto 5.

3.1.3. Tasa de decaimiento.

Si el radio nucleido producto, de una reacción inducida por neutrones, es estable, el número de núcleos producidos se calcula fácilmente a partir de la ecuación de activación [1] al multiplicar por el tiempo de irradiación, t:

Número de núcleos = σ.φ. N t

Sin embargo, si el radio nucleido producto es radiactivo, tendrá una velocidad o tasa de decaimiento que habrá que tener cuenta. El radio nucleido producido decaerá con una vida media característica. Si hay *N** núcleos radiactivos, la tasa de decaimiento *dN*/dt* del núcleo es proporcional a N*.

$$dN^*/dt \propto -N^* = -\lambda N^*$$

Donde λ es la constante de decaimiento, la cual tiene un valor característico para cada radio nucleido. Así la ecuación se integra entre los límites N_0^* en el tiempo cero, y N* en el tiempo t:

$$N^* = N_0^* \exp(-\lambda t)$$

Y, expresando la vida media como el tiempo en que la cantidad de nucleídos del se reducen a la mitad:

$$N_0^*/2 = N_0^* \exp(-\lambda T_{1/2})$$

$$T_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0{,}693 / \lambda \qquad [3]$$

En papel semilogarítmico, se representa la tasa de decaimiento frente al tiempo y dará una línea recta con una pendiente de -λ.

La vida media es característica de un radio nucleido particular, por lo que se puede usar para identificar una especie desconocida, o para confirmar la identidad del radionucleidos que está siendo medido.

3.1.4. Actividad inducida.

Si el producto de la activación es radiactivo, y decae con su vida media característica, el radionucleído se está produciendo a una tasa descrita por la ecuación de activación [1], y decayendo con una vida media característica. En consecuencia, el crecimiento de la actividad se gobierna por la diferencia entre:

Tasa de producción = tasa de activación - tasa decaimiento

$$dN^*/dt = \sigma \varphi N - \lambda N^*$$

$$N^* = \sigma \varphi N (1 - exp(-\lambda t))/\lambda$$

La actividad o tasa de desintegración (A_0) al fin del tiempo de radiación *t* es, entonces:

$$A_0 = \lambda N^* = \sigma\varphi N(1-exp(-\lambda t)) \quad [4]$$

En consecuencia, el crecimiento de la actividad inducida con el tiempo se controla por la vida media del producto de activación. Cuando el tiempo de radiación es muy largo, la expresión para la actividad no llega próxima a la actividad máxima posible para un flujo de neutrones particular, llamada actividad de saturación (A_s):

$$A_s = \sigma \varphi N \quad [5]$$

La actividad de saturación que es independiente de la vida media del producto de activación y depende solamente del valor del flujo de neutrones y de la sección eficaz de los neutrones.

A menos que el producto de activación tenga una vida media relativamente corta, no es conveniente que la curva de crecimiento alcance la saturación. Entonces, la forma usual de la ecuación para la actividad al fin de una irradiación durante un tiempo t es la de la ecuación [4]:

$$A_0 = \sigma \varphi N (1-exp(-\lambda t))$$

Es posible calcular la actividad específica inducida para un tiempo particular de irradiación, conociendo las constantes nucleares para el nucleido de interés y el flujo de neutrones:

$$A_0 = \sigma\varphi w N_A\theta (1-exp(-\lambda t))/A \quad [6]$$

Normalmente, en el análisis por activación neutrónica, la actividad del radionucleído se mide experimentalmente en una muestra para deducir la masa desconocida del elemento usando la ecuación de activación:

$$w = A_0A/N \sigma\varphi\theta (1- exp(-\lambda t))$$

Se deben hacer correcciones para el periodo de decaimiento t_d antes del contaje:

$$w = A_0A/N \sigma\varphi\theta (1- exp(-\lambda t)) exp(-\lambda t_d) \quad [7]$$

3.1.5. Interferencias nucleares.

Se ha visto de la sección anterior que los isótopos estables de un elemento pueden dar lugar por activación de neutrones a diferentes nucleidos dependiendo de la energía del flujo de neutrones.

Por eso, es posible que distintas reacciones tengan lugar a través de reacciones nucleares diferentes, de manera que dan el mismo núcleo producto. Por ejemplo, en una muestra de roca que contiene aluminio, sílice y fósforo que puedan concurrir las siguientes reacciones: neutrón gamma; neutrón protón; y neutrón alfa, en un flujo de neutrones consistente tanto de neutrones termales como rápidos:

$$^{27}_{13}Al + n \rightarrow {}^{28}_{13}Al + \gamma$$

$$^{28}_{14}Si - n \rightarrow {}^{28}_{13}Al + p$$

$$^{31}_{15}P + n \rightarrow {}^{28}_{13}Al + \alpha$$

La actividad del ^{28}Al en este caso, puede deberse al aluminio, a la sílice o al fósforo en la misma muestra. El efecto de la interferencia dependerá de la sección eficaz de cada núcleo objetivo y de la cantidad de componentes termales y rápidos del flujo de neutrones. Otros ejemplos de reacciones que entran en competencia incluyen al:

$$^{51}V(n.\gamma)^{52}V \text{ y } {}^{52}Cr\ (n,p)^{52}V$$

$$^{41}K\ (n,\gamma)^{42}K \text{ y } {}^{42}Ca(n,p)^{42}K$$

$$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co \text{ y } {}^{63}Cu(n,\alpha)^{60}Co$$

Cuando se seleccionan un producto de activación para un análisis, es importante asegurarse de que no hay reacciones en competencia que puedan afectar a los resultados.

Otra reacción nuclear que es una fuente común interferencia es la fisión. Cuando por ejemplo el uranio fisiona, se producen un gran número de productos de fisión. Algunos productos de fisión son muy inestables y decaen rápidamente a otros radionucleídos. Los productos de fisión predominantes tienden a ser aquellos cuyas masas están alrededor de 95 y 140, tales como el ^{95}Zr, ^{103}Ru, ^{137}Cs, ^{140}Ba, y ^{144}Ce. Los radio nucleídos producidos por reacciones neutrón gamma, con los elementos raros, particularmente, están afectados por la interferencia de productos de fisión. Por ejemplo, el ^{140}La, ^{141}Ce, ^{147}Nd, y ^{153}Sm, se producen todos ellos a través de reacciones neutrón gamma, y por medio de la fisión de uranio. El problema que es particularmente importante en el análisis de rocas de uranio a partir de lantánidos.

El auto blindaje de los neutrones, también puede causar interferencias en la activación del núcleo objetivo. Esto ocurre cuando un elemento en la matriz de la muestra absorbe neutrones en competición con el objetivo de interés. Por ejemplo, un material con una sección eficaz alta a los neutrones termales, tal como el boro absorben neutrones, y por eso reduce los neutrones termales de una fuente de tal manera que el objetivo podría ver un flujo de neutrones más bajo y ser activado a una extensión menor de lo que se esperaba. Este efecto es mayor al aumentar la masa de la muestra y puede ser detectado al irradiar un rango de masas de muestra y calcular la actividad inducida por unidad másica. Si ocurre el auto blindaje de neutrones, al aumentar la masa de la muestra disminuirá la actividad por unidad másica.

Este problema de interferencia ocurre en la activación del flúor y debe tenerse en cuenta. En el punto 5.2.3.2 se estudian estas interferencias.

3.2. Características principales del flúor.

Los minerales de los que se extrae el flúor pueden ser la fluorita, la criolita y el flúor apatito. Las características principales del flúor se exponen en las siguientes tablas:

Datos Generales	
Nombre,	Flúor,
símbolo	F
número	9
Serie química	Halógenos
Grupo	17
periodo	2
bloque	p
Densidad	1,696 kg/m3
Apariencia	gas pálido verde-amarillo

Tabla 3. Datos generales del F.

Propiedades atómicas	
Peso atómico	18,9984032 uma
Radio medio	50 pm
Radio atómico calculado	42 pm
Radio covalente	71 pm
Radio de Van der Waals	147 pm
Configuración electrónica	[He]2s22p5
Estados de oxidación (óxido)	-1 (ácido fuerte)
Estructura cristalina	Cúbica

Tabla 4. Propiedades atómicas del F.

Propiedades físicas	
Estado de la materia	Gas (no magnético)
Punto de fusión	53,53 K
Punto de ebullición	85,03 K
Volumen molar	11,20 ×10-6 m3/mol
Entalpía de vaporización	3,2698 kJ/mol
Entalpía de fusión	0,2552 kJ/mol

Tabla 5. Propiedades físicas.

Información diversa	
Electronegatividad	3,98 (Pauling)
Calor específico	824 J/(kg·K)
Conductividad térmica	0,0279 W/(m·K)
1° potencial de ionización	1681,0 kJ/mol
2° potencial de ionización	3374,2 kJ/mol
3° potencial de ionización	6050,4 kJ/mol
4° potencial de ionización	8407,7 kJ/mol
5° potencial de ionización	11022,7 kJ/mol
6° potencial de ionización	15164,1 kJ/mol
7° potencial de ionización	17868 kJ/mol
8° potencial de ionización	92038,1 kJ/mol
9° potencial de ionización	106434,3 kJ/mol

Tabla 6. Otros datos del F.

Isótopos más estables
19F

Tabla 7. Isótopos estables del F.

Número másico	Vida media	Modo de decaimiento
14	No hay datos disponibles.	Emisión de protones
15	4.57100×10^{-22} s	Emisión de protones
16	1.14275×10^{-20} s	Emisión de protones
17	64.49 s	Captura de electrones
18	109.77 m	Captura de electrones
19	Estable	-
20	11.07 s	Decaimiento beta negativo
21	4.158 s	Decaimiento beta negativo
22	4.23 s	Decaimiento beta negativo
		Decaimiento beta negativo con emisión de neutrones diferidos
23	2.23 s	Decaimiento beta negativo
24	400 ms	Decaimiento beta negativo
		Decaimiento beta negativo con emisión de neutrones diferidos
25	50 ms	Decaimiento beta negativo
		Decaimiento beta negativo con emisión de neutrones diferidos
26	9.6 ms	Decaimiento beta negativo
		Decaimiento beta negativo con emisión de neutrones diferidos
27	5.0 ms	Decaimiento beta negativo
		Decaimiento beta negativo con emisión de neutrones diferidos
28	<40 ns	Neutron Emission
29	2.5 ms	Decaimiento beta negativo
		Decaimiento beta negativo con emisión de neutrones diferidos

Tabla 8. Isótopos del flúor.

El flúor es un elemento químico de número atómico 9 situado en el grupo de los halógenos (grupo 17) de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es F**.**

Es un gas a temperatura ambiente, de color amarillo pálido, formado por moléculas diatómicas F_2. Es el más electronegativo y reactivo de todos los elementos. En forma pura es altamente peligroso, causando graves quemaduras químicas en contacto con la piel.

El flúor es un gas corrosivo de color amarillo pálido, fuertemente oxidante. Es el elemento más electronegativo y reactivo y forma compuestos con prácticamente todo el resto de elementos, incluyendo los gases nobles xenón y radón. Incluso en ausencia de luz y a bajas temperaturas, el flúor reacciona explosivamente con el hidrógeno. Bajo un chorro de flúor en estado gaseoso, el vidrio, metales, agua y otras sustancias, se queman en una llama brillante. Siempre se encuentra en la naturaleza combinado y tiene tal afinidad por otros elementos, especialmente silicio, que no se puede guardar en recipientes de vidrio.

En disolución acuosa, el flúor se presenta normalmente en forma de ión flúoruro, F-. Otras formas son flúorocomplejos como el [FeF4]-, o el H2F+.

Los flúoruros son compuestos en los que el ión flúoruro se combina con algún resto cargado positivamente.

El flúor es un elemento químico esencial para el ser humano.

3.2.1. Aplicaciones del flúor.

El politetraflúoroetileno (PTFE), también denominado teflón, se obtiene a través de la polimerización de clorodifluorometano, el cual se obtiene a partir de la fluoración del correspondiente derivado halogenado con fluoruro de hidrógeno, HF.

También a partir de HF se obtienen clorofluorocarburos (CFCs), hidrocloroflúorocarburos (HCFCs) e hidroflúorocarburos (HFCs).

Se emplea flúor en la síntesis del hexafluoruro de uranio, UF6, que se utiliza en el enriquecimiento del 235U.

El fluoruro de hidrógeno se emplea en la obtención de criolita sintética, Na3AlF6, la cual se usa en el proceso de obtención de aluminio.

Hay distintas sales de flúor con variadas aplicaciones. El fluoruro de sodio, NaF, se emplea como agente flúorante; el diflúoruro de amonio, NH4HF2, se emplea en el tratamiento de superficies, anodizado del aluminio, o en la industria del vidrio; el trifluoruro de boro, BF3, se emplea como catalizador; etc.

Algunos fluoruros se añaden a la pasta de dientes y al agua potable para la prevención de caries.

Se emplea flúor monoatómico en la fabricación de semiconductores.

El hexafluoruro de azufre, SF6, es un gas dieléctrico con aplicaciones electrónicas. Este gas contribuye al efecto invernadero y está recogido en el Protocolo de Kioto.

3.2.2. Historia del flúor.

El flúor (del latín *fluere*, que significa "fluir") forma parte del mineral fluorita, CaF_2, fue descrito en 1529 por Georigius Agricola por su uso como fundente, empleado para conseguir la fusión de metales o minerales. En 1670 Schwandhard observó que se conseguía grabar el vidrio cuando éste era expuesto a fluorita que había sido tratada con ácido. Karl Scheele y muchos investigadores posteriores, por ejemplo Humphry Davy, Gay-Lussac, Antoine Lavoisier o Louis Thenard, realizaron experimentos con el ácido fluorhídrico (algunos de estos acabaron en tragedia).

No se consiguió aislarlo hasta muchos años después debido a que cuando se separaba de alguno de sus compuestos, inmediatamente reaccionaba con otras sustancias. Finalmente, en 1886, el químico francés Henri Moissan lo consiguió aislar.

La primera producción compercial de flúor fue para la bomba atómica del Proyecto Manhattan, en la obtención de hexafluoruro de

uranio, UF_6, empleado para la separación de isótopos de uranio. Este proceso se sigue empleando para aplicaciones de energía nuclear.

3.2.3. Abundancia y obtención

El flúor es el halógeno más abundante en la corteza terrestre, con una concentración de 950 ppm. En el agua de mar está se encuentra en una proporción de aproximadamente 1,3 ppm. Los minerales más importantes en los que está presente son la fluorita, CaF_2, el fluorapatito, $Ca_5(PO_4)_3F$ y la criolita, Na_3AlF_6.

El flúor se obtiene mediante electrolisis de una mezcla de HF y KF. Se produce la oxidación de los fluoruros:

$$2F^- - 2e^- \leftrightarrows F_2$$

En el cátodo se descarga hidrógeno, por lo que es necesario evitar que entren en contacto estos dos gases para que no haya riesgo de explosión.

3.2.4. Compuestos del flúor.

Se emplean numerosos compuestos orgánicos en los que se han sustituido formalmente átomos de hidrógeno por átomos de flúor. Hay distintas formas de obtenerlos, por ejemplo mediante reacciones de sustitución de otros halógenos:

$$CHCl_3 + 2HF \leftrightarrows CHClF_2 + 2HCl$$

- Los CFCs se han empleado en una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo como refrigerantes, propelentes, agentes espumantes, aislantes, etc., pero debido a que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono se han ido sustituyendo por otros compuestos químicos, como los HCFs. Los HCFCs también se emplean como sustitutos, pero también destruyen la capa de ozono, aunque en menor medida a largo plazo.
- El politetraflúoroetileno (PTFE), es un polímero denominado comúnmente teflón.

El ácido fluorhídrico es una disolución de fluoruro de hidrógeno en agua. Es un ácido débil, pero mucho más peligroso que ácidos fuertes como el clorhídrico.

El hexafluoruro de uranio, UF_6, es un gas a temperatura ambiente que se emplea para la separación de isótopos de uranio.

El flúor forma compuestos con otros halógenos presentando el estado de oxidación -1, por ejemplo, IF_7, BrF_5, BrF_3, ClF, etcétera.

La criolita natural, Na_3AlF_6, es un mineral que contiene fluoruros. Extraía en Groenlandia, pero ahora está prácticamente agotada, por lo que se obtiene sintéticamente para ser empleada en la obtención de aluminio.

3.2.5. Papel biológico del flúor.

El flúor es un oligoelemento en mamíferos en su forma de flúoruro. Se acumula en huesos y dientes dándoles una mayor resistencia. Se añaden flúoruros en pequeñas cantidades en pastas dentales y en aguas de consumo para evitar la aparición de caries.

3.2.6. Isótopos del flúor.

El flúor tiene un único isótopo natural, el 19F. Este isótopo tiene un número cuántico de espín nuclear de 1/2 y se puede emplear en espectroscopía de resonancia magnética nuclear. Se suele emplear como compuesto de referencia el triclorofluorometano, $CFCl_3$.

3.2.7. Precauciones

El flúor y el HF deben ser manejados con gran cuidado y se debe evitar totalmente cualquier contacto con la piel o con los ojos.

Tanto el flúor como los iones fluoruro son altamente tóxicos. El flúor presenta un característico olor acre y es detectable en unas concentraciones tan bajas como 0,02 ppm, por debajo de los límites de exposición recomendados.

3.3. Métodos de análisis del flúor.

En este apartado se expone la base del método utilizado en la actualidad para detectar el flúor en muestras de fluorita. Este método es un método químico.

También se apuntan otros métodos modernos de análisis elemental y la aplicación que tiene para la detección del flúor.

En la página Web

http://www.shsu.edu/~chm_tgc/sounds/sound.html

se muestran algunas interesantes animaciones sobre el fundamento de estos sistemas. De todo lo leído en este aspecto se observa que por diferentes razones, el método que se recomienda y se utiliza habitualmente para el análisis del flúor, es el método químico.

3.3.1. Métodos químicos.

Los métodos convencionales de análisis de la fluorita generalmente son de tipo químico y su metódica se basa en principios conocidos basados en el método Bidtel [22]. El método conlleva los siguientes pasos:

[1] DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y ÓXIDOS SOLUBLES EN ÁCIDO ACÉTICO.

- TIPO DE MÉTODO: Gravimétrico basado en el método Bidtel.

[2] DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN CALCITA ($CaCO_3$).

[3] DETERMINACIÓN DE SÍLICE.

[4] DETERMINACIÓN DE LA BARITA.

[5] FLUORURO CÁLCICO (F_2Ca).

Este método se está empleando en la actualidad por las empresas interesadas en el conocimiento de la ley de flúor en una muestra, y en particular por la empresa MINERSA.

Otros procedimientos actualmente usados para la determinación elemental, se exponen en los siguientes apartados.

3.3.2. Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo. ICP-MS.

El sistema ICP-MS es una herramienta muy útil que permite detectar y analizar elementos traza. Durante varios años se convirtió en el sistema elegido por muchos laboratorios para proporcionar las medidas precisas con los límites detección más bajos.

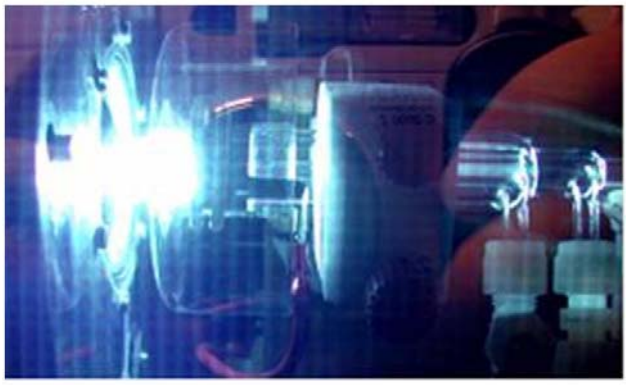


Figura 2. Equipo ICP-MS.

ICP-MS es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/l – mg/l).

Su principal característica es que posee unos límites de detección para la mayoría de los elementos de unas pocas ppb – ppt que lo hace ideal para el análisis de elementos traza.

En este análisis, se vaporiza una muestra líquida por medio de un plasma de Ar. Los iones formados pasan al espectrómetro de masas donde se separan mediante un analizador y son detectados.

Tiene gran variedad de aplicaciones en las siguientes áreas: biología, física de materiales, medioambiente, geoquímica.

El método se puede desarrollar por dos procedimientos: cuadripolo o alta resolución. En la Figura 3 se observa, el límite de detección de esta técnica para distintos elementos de la tabla periódica por las dos variedades de este procedimiento, y se ve como no se aplica al flúor.

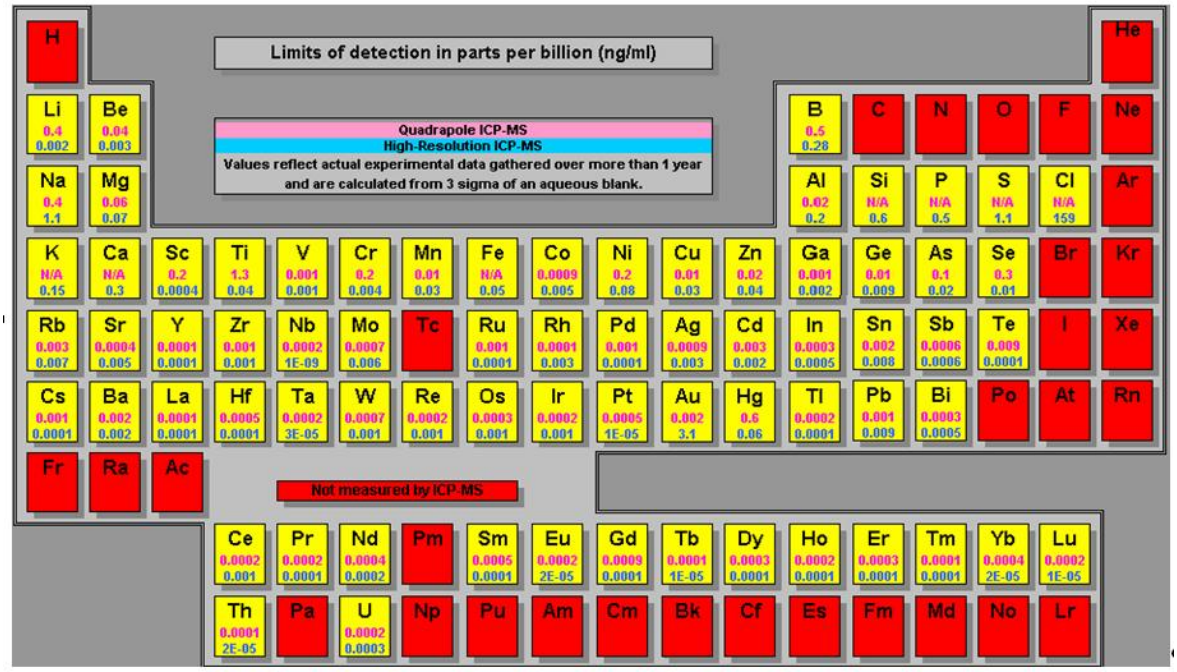


Figura 3. Limites de detección para los distintos elementos para el método ICP-MS. (http://www.elementalanalysis.com/).

3.3.3. Emisión de Rayos X inducida por protones (PIXE).

Cuando un haz de partículas provenientes de un acelerador de particulas incide sobre una muestra se produce, entre otros tipos de fenómenos, la excitación de los átomos de esta, acompañado por la emisión de radiación-X característica de los elementos presentes.

Esta radiación X se analiza mediante un sistema de detección convencional, el cual incluye, un cristal de silicio dopado con litio a una temperatura de 77° K, electrónica de amplificación de pulsos y una tarjeta multicanal (analógico- digital) conectada al ordenador. El resultado de tal análisis es un espectro de cuentas, repartidas en un cierto número de canales, en función de la energía del fotón X de que se trate.

En torno a determinados canales se produce una acumulación de cuentas de forma gaussiana, cuyo canal central corresponde a la energía característica de emisión de algún átomo presente en la muestra. Las áreas de estos picos son proporcionales a la concentración en $\mu g/cm^3$ de determinado elemento químico presente. El espectro se analiza por algún programa que determina las áreas de los picos, y los asocia a cada elemento, pudiéndose además, ajustar el área de fondo (background) de acuerdo a una función predeterminada.

La técnica PIXE se puede aplicar a sólidos, líquidos, polvos o filtros de aerosoles. En la Figura 4, se aprecian los límites de detección para distintos elementos según esta técnica y se observa que no se aplica al flúor.

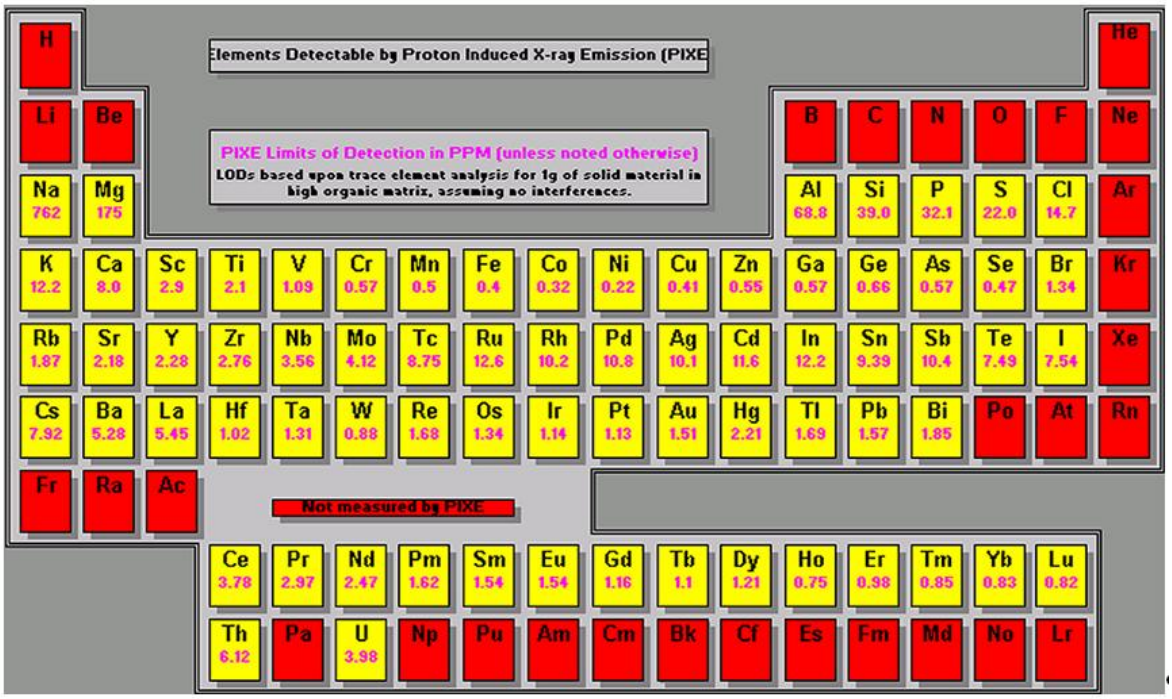


Figura 4. Limites de detección para los distintos elementos para el método PIXE. (http://www.elementalanalysis.com/).

3.3.4. Espectrometría de estructura fina de absorción de Rayos X. (XAFS).

Esta es una técnica de análisis elemental que usa la medida de la variación, o estructura fina, del coeficiente de absorción de Rayos X con la energía en la vecindad de uno de los límites de absorción característicos del elemento de interés.

En la Figura 5, se aprecian los límites de detección para distintos elementos según esta técnica y se observa que no se aplica al flúor.

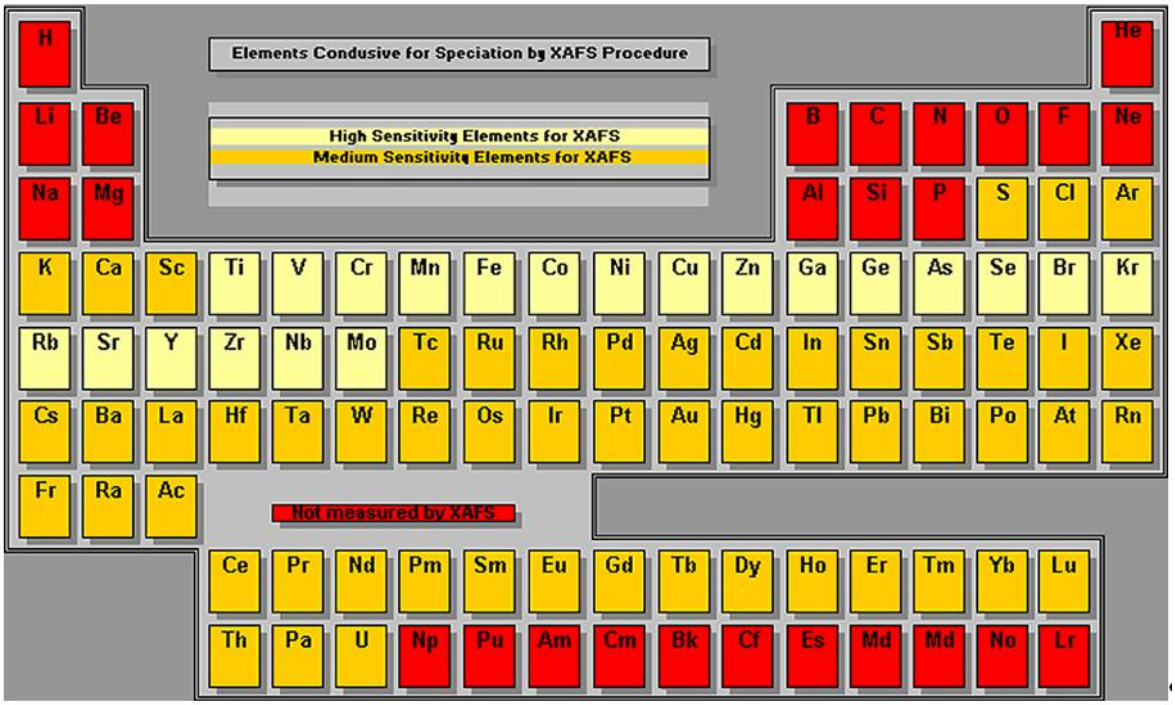


Figura 5. Límites de detección para los distintos elementos para el método XAFS. (http://www.elementalanalysis.com/).

3.3.5. Espectroscopia de resonancia magnética nuclear.

La espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) es una técnica empleada principalmente en la elucidación de estructuras moleculares, aunque también se puede emplear con fines cuantitativos.

Algunos núcleos atómicos sometidos a un campo magnético externo absorben radiación electromagnética en la región de las frecuencias de radio o radiofrecuencias. Como la frecuencia exacta de esta absorción depende del entorno de estos núcleos, se puede emplear para determinar la estructura de la molécula en donde se encuentran éstos.

Para que se pueda emplear la técnica los núcleos deben tener un momento magnético distinto de cero. Esta condición no la cumplen los núcleos con número másico y número atómico par. Los núcleos más importantes en química orgánica son: ^{1}H, ^{13}C, ^{31}P, ^{19}F y ^{15}N. Otros núcleos importantes: ^{29}Si, ^{77}Se, ^{117}Sn, ^{195}Pt, ^{199}Hg, ^{203}Tl, ^{205}Tl, ^{207}Pb.

Se prefieren los núcleos de número cuántico de espín nuclear igual a 1/2, pues si no dan señales muy anchas. También es mejor que el isótopo sea abundante en la naturaleza, pues si no dan señales débiles. Por eso, uno de los más útiles en la elucidación de estructuras es el ^{1}H, dando lugar a la espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón. También es importante en química orgánica el ^{13}C, pero se trata de un isótopo poco abundante y presenta dificultades.

3.3.6. Espectrometría de absorción atómica. (AAS).

Es una técnica analítica que mide la concentración de los elementos haciendo uso de las longitudes de onda de la luz absorbidas específicamente por un elemento, y que corresponden a las energías necesarias para desplazar electrones desde un nivel de energía a otro mayor.

Tiene muchos usos en diferentes campos, como en análisis químicos, análisis medioambiental, farmacia, industria, y minería. En este último caso sirve para determinar la concentración en oro en las rocas.

Los átomos de los diferentes elementos absorben una longitud de onda característica de la luz. El análisis de una muestra para ver si tiene un elemento particular, por ejemplo plomo, se debe usar una lámpara que emite luz procedente de dicho elemento. Por ejemplo, una lámpara que contiene plomo emite luz procedente de átomos de plomo excitados que producen una mezcla correcta de longitudes de onda que son absorbidas por átomos de la muestra.

En AAS se atomiza la muestra para convertirla en átomos libres en estado vapor y se pasa a través de este vapor la radiación electromagnética emitida a partir de los átomos de plomo excitados. Parte de la radiación se absorbe por los átomos de plomo de la muestra. Cuantos más átomos de plomo haya en el vapor, se absorberá más radiación, por lo que la cantidad de luz absorbida es proporcional al número de átomos. A través de una curva de calibración construida con muestras de concentración conocida, se puede comparar la respuesta de la muestra y determinar su concentración.

3.4. Fundamentos teóricos de las reacciones nucleares.

Los neutrones tienen distintos modos de reaccionar con los núcleos de los distintos elementos según sea el elemento, y según sea su energía.

Los neutrones pueden tener un amplio rango de energías. En un reactor nuclear termal, por ejemplo, se moderan los neutrones y la mayoría son termales o lentos, con una energía media de alrededor de 0,025 eV. Un generador de neutrones, se diseña para producir neutrones rápidos con una energía de 14 MeV. La región de energía comprendida entre los neutrones termales y los rápidos se llama la región epitermales, y se extiende desde 0,5eV a 1MeV. El corte inferior de 0,5eV, se define por la energía, por debajo de la cual, los neutrones no pasan a través de una lámina de cadmio de 1 mm de espesor. Por eso a veces se refiere a ella como corte del cadmio.

[1] Un tipo de reacción de los neutrones con la materia es la reacción de absorción del neutrón: El neutrón se absorbe por un núcleo objetivo, para producir un estado energético superior del núcleo resultante, conteniendo un neutrón adicional, y el exceso de energía se pierde inmediatamente, usualmente por la emisión de un "***rayo gamma***", un "***protón***", o una "***partícula alfa***". La

energía del neutrón afectará a la naturaleza de la reacción nuclear que ocurra y, consecuentemente al producto de la activación.

[2] **La reacción principal** que ocurre con los neutrones termales, **es la reacción neutrón - gamma**. En este caso, el nivel energético superior del núcleo producto, se desexcita por la emisión de un rayo gamma, el cual se llama rayo gamma instantáneo, ya que se emite inmediatamente después de la activación.

$$^{27}_{13}Al + n \rightarrow ^{28}_{13}Al + \gamma$$

[3] **Los neutrones rápidos** inducen reacciones diferentes. La absorción ocurre con la expulsión de un protón, (en este caso es **una reacción neutrón, protón**),

$$^{31}_{15}P + n \rightarrow ^{31}_{14}Si + p$$

o bien, con la producción de una partícula alfa, (en este caso una **reacción neutrón, alfa**).

$$^{23}_{11}Na + n \rightarrow ^{20}_{9}F + \alpha$$

Los rayos gamma, los protones y las partículas alfa producidos durante estas reacciones, se emiten todos ellos espontáneamente, y por eso, son detectados si se monitorizan durante el proceso de activación.

Es posible ver las tres reacciones al mismo tiempo que ocurren con un núcleo objetivo por ejemplo en el caso del 23Na,

$$^{23}_{11}Na + n \rightarrow ^{24}_{11}Na + \gamma$$

y

$$^{23}_{11}Na + n \rightarrow ^{23}_{10}Ne + p$$

Así, en un flujo de neutrones consistente de neutrones lentos y rápidos la activación del 23Na dará como resultado la producción de 24Na, 20F y 23Ne. Los productos debidos a la activación, en el caso de sodio, son todos radiactivos, pero en otros casos pueden originar isótopos estables.

El producto es estable o no dependiendo de la relación entre neutrones y protones en el núcleo. Un elemento puede tener varios isótopos con un intervalo de números másicos. Un isótopo estable, tiene una relación de neutrones a protones próxima a uno para elementos ligeros, y aumenta a alrededor de 1,5 para elementos pesados. Si la relación está fuera de la banda para isótopos estables, el núcleo será inestable, y volverá al estado estable durante un decaimiento radiactivo. Un núcleo por eso puede ser convertido radiactivo por la absorción de un neutrón adicional en el núcleo, pero, sin embargo, es bastante posible que la adición de un neutrón en un núcleo estable, produzca un núcleo producto estable también.

En este capítulo se estudian detalladamente los tipos de reacciones con los neutrones, y, en el caso de que los productos de estas reacciones no sean estables y decaigan hasta convertirse en estables, los subproductos que se originan en su decaimiento.

3.4.1. Tipos de reacciones con los neutrones.

Los neutrones carecen de carga eléctrica y no sufren la acción de campos eléctricos ni magnéticos, sin embargo, se ven afectados por la fuerza nuclear. En consecuencia, no ionizan directamente a los materiales al no interaccionar con los electrones; el único efecto que pueden producir es chocar directamente con los núcleos. Tienen aproximadamente la misma masa que un protón, y cientos de veces más que la masa de un electrón. Son capaces de atravesar grandes espesores de material.

Cuando llegan a incidir directamente sobre un núcleo, puede suceder cualquiera de dos procesos: la dispersión elástica y la reacción nuclear, que incluye la dispersión inelástica, la captura radiactiva y la fisión nuclear. En algunas reacciones hay absorción de neutrones, en otras hay, además, producción de partículas. El proceso en el cual los neutrones reducen su energía o número se llama atenuación.

En la mayoría de las reacciones productoras de neutrones, éstos son emitidos con energías del orden de varios MeV, denominándose rápidos. Al incidir en cualquier material, los neutrones rápidos sufren preferentemente dispersiones elásticas con los núcleos. Van rebotando de núcleo en núcleo, perdiendo cada vez una fracción de su energía inicial, hasta que después de muchos choques (pueden ser varios cientos) su velocidad promedio es comparable con las velocidades térmicas de las moléculas. Se llaman entonces neutrones térmicos, y sus energías son del orden de 1/ 40 de eV. Los neutrones térmicos sufren más reacciones nucleares que los rápidos.

3.4.1.1. Reacciones de dispersión.

La dispersión, o pérdida de velocidad del neutrón puede hacerse por dos tipos de interacciones: dispersión inelástica y dispersión elástica. El empleo del término dispersión para describir estas reacciones, se justifica por el hecho de que, en general, la dirección del neutrón después de la interacción, es diferente a la que tenía antes de la interacción con el núcleo. La abreviatura generalmente usada para definir las reacciones de dispersión es (n, SCT)

a. En la dispersión inelástica, indicada con la abreviatura (n, INL), la energía total del sistema no se conserva. En la reacción de dispersión inelástica el núcleo captura un neutrón, por lo que realmente es una reacción nuclear, y el núcleo compuesto expulsa rápidamente otro neutrón, cuya energía cinética es inferior a la del neutrón capturado, quedándose el núcleo residual en estado excitado. Cuando el núcleo decae a su nivel de energía original, emite una radiación, normalmente, un rayo gamma llamado rayo gamma de dispersión inelástica. En estos procesos, como se ha dicho antes, la energía cinética del sistema no se conserva, y como la energía cinética del objetivo es, en general, despreciable en comparación con la del neutrón incidente, en una interacción inelástica, la energía del neutrón incidente debe ser mayor que la energía del primer nivel excitado. Para elementos con número de masa medio alto, la energía mínima de excitación es del orden de 0,1

MeV. Al disminuir la masa, en general tiende a aumentar la energía de excitación, por lo que se requerirán neutrones de más energía para producir este tipo de dispersión, (de unos 6MeV para el oxígeno por ejemplo).

La probabilidad de que tenga lugar la dispersión inelástica aumenta con la energía en comparación con la probabilidad del proceso de captura radiactiva y otras alternativas que se verán posteriormente respecto a la absorción del neutrón incidente. Esto ocurre porque, a medida que aumenta la energía de excitación disminuye la separación entre los niveles nucleares, o sea, hay más estados excitados por intervalo de energía para ser ocupados tras la expulsión de un neutrón, a lo que corresponde una mayor probabilidad de que el núcleo compuesto emita un neutrón.

b. Los neutrones con energías menores a 0,1 MeV no pueden perder energía por colisiones inelásticas por lo que se vio anteriormente. Para el caso de interacciones de dispersión elástica, la única condición es que satisfaga el principio de conservación de la energía cinética sin que existan limitaciones en cuanto a la forma en que se distribuye esta energía entre el neutrón y el núcleo. Hay dos alternativas en este caso: la formación o no del núcleo compuesto. En ambos casos, el núcleo bombardeado permanece en su estado fundamental y todo el proceso puede analizarse como la interacción de dos partículas clásicas donde se conserva la energía y la cantidad de movimiento, es decir, como el clásico choque de dos bolas de billar, aunque en nuestro caso el blanco u objetivo es siempre más pesado que el proyectil.

   Al chocar el neutrón con un núcleo, rebota en cualquier dirección, transfiriéndoles al núcleo una cantidad de energía cinética.

   Esta energía transferida es mayor entre más ligero sea el núcleo, y también es mayor si el núcleo sale hacia adelante. La energía transferida es a costa de la energía del neutrón incidente, por lo que éste es desviado en cada colisión y pierde una fracción de su energía, pero nótese que no desaparece. Cuando un neutrón choca con un átomo éste le absorbe y queda en estado excitado.

   El núcleo compuesto expulsa otro neutrón con una energía inferior a la del neutrón incidente, y si la energía extra adquirida por el núcleo es de naturaleza exclusivamente cinética, se dice que la dispersión es de tipo elástico.

   En definitiva, equivale a decir que el neutrón le cede parte de su energía al núcleo, mientras que el átomo recibe energía cinética.

   Tras un número suficiente de colisiones elásticas, la velocidad de los neutrones se reduce de tal manera que su energía cinética media se hace aproximadamente igual a la de los átomos del medio dispersante, que depende de la temperatura, y se llama energía térmica. Un neutrón en equilibrio térmico con los átomos del medio (neutrón

térmico), recibe y entrega energía alternativamente en colisiones con los núcleos del material, pero de forma tal que la energía media de un gran número de ellos se mantiene constante.

Esta reacción se expresa con la abreviatura (n,EL).

Como producto de los sucesivos choques el neutrón pierde velocidad en forma gradual, hasta alcanzar una magnitud de 2.200 metros/segundo. A estos neutrones se les denomina, como se ha dicho anteriormente, "neutrones térmicos".

Si un neutrón colisiona con un núcleo atómico y sus masas son muy parecidas, entonces el neutrón pierde una gran cantidad de energía. Mayor será la pérdida de energía mientras más se asemejen sus masas. Por lo tanto, los choques que aseguran gran pérdida de energía ocurren con los núcleos de los átomos de Hidrógeno. El proceso por el cual los neutrones reducen su velocidad en forma gradual recibe el nombre de "Termalización" o "Moderación de Neutrones".

3.4.1.2. Reacciones de absorción. Captura radiactiva.

En este tipo de reacción, los neutrones son absorbidos igualmente al caso de la dispersión inelástica, por los núcleos de los átomos circundantes. El neutrón se captura, pero el átomo queda en un estado excitado. El núcleo emite una radiación o una partícula hasta alcanzar un nivel estable. Cuando emite una radiación gamma, el proceso se denomina llama captura radiactiva, y la energía de la radiación gamma es característica del elemento capturador del neutrón. Esta reacción ocurre en muchos niveles de energía del neutrón, pero es más probable en niveles más bajos de energía.

Los neutrones pueden inducir muchos otros tipos de reacción nuclear, emitiéndose, por ejemplo, protones, partículas alfa, deuterones y combinaciones de éstos. Realmente, la dispersión inelástica es una reacción de absorción en la que la partícula emitida es un neutrón. La simbología utilizada en este tipo de reacciones es la siguiente:

- Partículas Alfa. En una reacción cuya abreviatura es N,A o bien n, α.
- Protones. El símbolo de esta reacción es n,p
- Rayos Gamma, que se representa por n,γ.
- Procesos no especificados, que se expresan por n,X.
- Deuterio, cuya simbología es n,D
- Tritio que se representa por n,T.

En los elementos pesados como el uranio, los neutrones pueden inducir la fisión nuclear, con la cual se emiten dos fragmentos pesados de fisión y varios nuevos neutrones.

Los daños causados en los materiales por los neutrones se deben a varios efectos. En una dispersión elástica, por ejemplo, primero el átomo golpeado es desplazado de su lugar original, luego se convierte en ión pesado con energía, la cual va perdiendo por ionización y excitación al atravesar el material, pudiendo finalmente producir otros

desplazamientos atómicos. Todos estos procesos alteran el material. Si se tratara de una captura radiactiva, por ejemplo, el núcleo golpeado emite un rayo gamma, el cual interacciona con el material según ya hemos visto. Otras reacciones nucleares liberan radiaciones energéticas que producen sus efectos correspondientes.

3.4.2. Productos de decaimiento radiactivo.

Los elementos que se producen durante las reacciones nucleares, si son radiactivos decaen según una forma característica. Si somos capaces de reconocer esta forma de decaimiento, podemos identificar los elementos formados durante la exposición de un elemento a los neutrones.

La forma de decaimiento implica la aparición de varios tipos de productos que se originan durante un proceso de decaimiento radiactivo y si reconocemos estos productos de decaimiento, reconoceremos la forma de decaimiento, y con ello podremos identificar y medir los elementos objetivo de los neutrones. Los productos de la forma de decaimiento son fundamentalmente las partículas alfa y beta, los rayos X y gamma, y los neutrones.

En la siguiente figura se muestra la transformación que sufre un elemento con número atómico Z y número másico N con los distintos modos de decaimiento radiactivo.

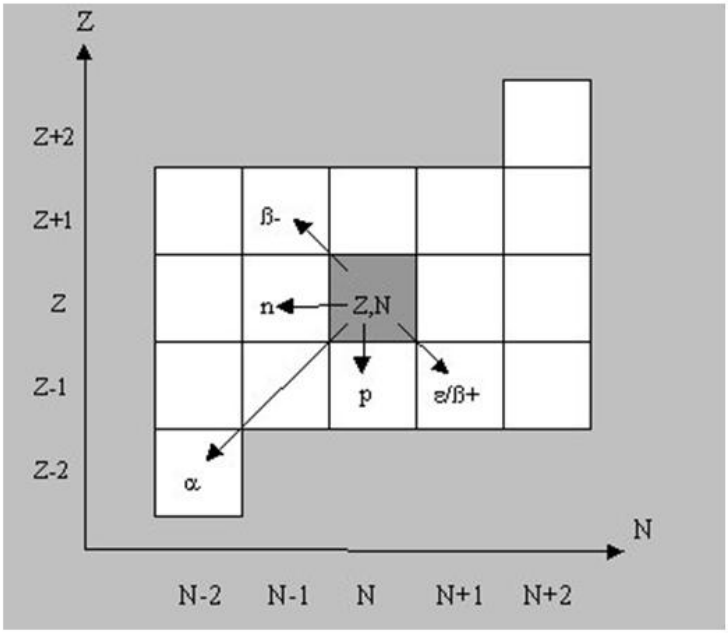


Figura 6. Modos de decaimiento radiactivo de un elemento.

Y en la siguiente tabla se especifican, poniendo ejemplos, los tipos o modos de decaimiento radiactivo que sufren los productos de las reacciones nucleares.

MODOS DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO		
Modo	**Definición**	**Ejemplo**
β−	Emisión de un Negatrón (electrón). Conversión de un neutrón en un protón, y emisión de un electrón y un antineutrino	$^{60}Co \rightarrow {}^{60}Ni + e^- + \bar{\nu}$
β+	Emisión de un Positrón. Conversión de un protón en un neutrón y emisión de un positrón y un neutrino. Siempre en competencia con el decaimiento EC.	$^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne + e^+ + \nu$
EC	Captura de electrones. Captura de un electrón atómico convirtiendo un protón en neutrón y emisión de un neutrino.	$^{57}Co + e^- \rightarrow {}^{57}Fe + \nu$
α	Emisión Alfa (^4He).	$^{238}U \rightarrow {}^{231}Pa + \alpha$
IT	Transición isomérica. Emisión de un -rayo γ o de un electrón de conversión a partir de un estado metaestable de larga vida. La emisión de un rayo γ a partir de estados excitados de vida corta, acompañan, frecuentemente a todos los modos de decaimiento.	$^{137m}Ba \rightarrow {}^{137}Ba + \gamma(662\ keV)$
SF	Fisión espontánea. División de un núcleo en núcleos más ligeros, normalmente acompañados por emisión de neutrones.	$^{252}Cf \rightarrow {}^{137}I + {}^{112}Rh + 3n$
p	Emisión de protones.	$^{145}Er \rightarrow {}^{144}Ho + p$
n	Emisión de neutrones.	$^{10}Li \rightarrow {}^{9}Li + n$
β−β−	Doble emisión de negatrón. Conversión de dos neutrones y dos protones y emisión de dos electrones y dos antineutrinos.	$^{128}Te \rightarrow {}^{128}Xe + 2e^- + 2\bar{\nu}$
ECEC	Captura de electrones de doble orbital. Conversión de dos protones y dos neutrones y emisión de dos positrones y dos neutrinos.	$^{124}Xe \rightarrow {}^{124}Te + 2e^+ + 2\nu$
β−x	Emisión de negatrones-diferidos de x=n,2n,α,...	$^{145}Cs \rightarrow {}^{144}Ba + e^- + \bar{\nu} + n$
ECx	Emisión de captura de electrones de x=p,α,SF,...	$^{147}Dy \rightarrow {}^{146}Tb + e^+ + \nu + p$
14C	Emisión de 14C. También se pueden emitir otros núcleos.	$^{226}Ra \rightarrow {}^{212}Pb + {}^{14}C$
Generalmente es cierto que un núcleo puede decaer por múltiples modos de decaimiento posibles energéticamente. Las intensidades de las ramificaciones de decaimiento son conocidas.		

Tabla 9. Descripción de los modos de decaimiento radiactivo.

En la Figura 7 se representa una tabla de isótopos con un código de colores, rosa, negro, amarillo, etc. Para cada tipo de decaimiento según la Tabla 9.

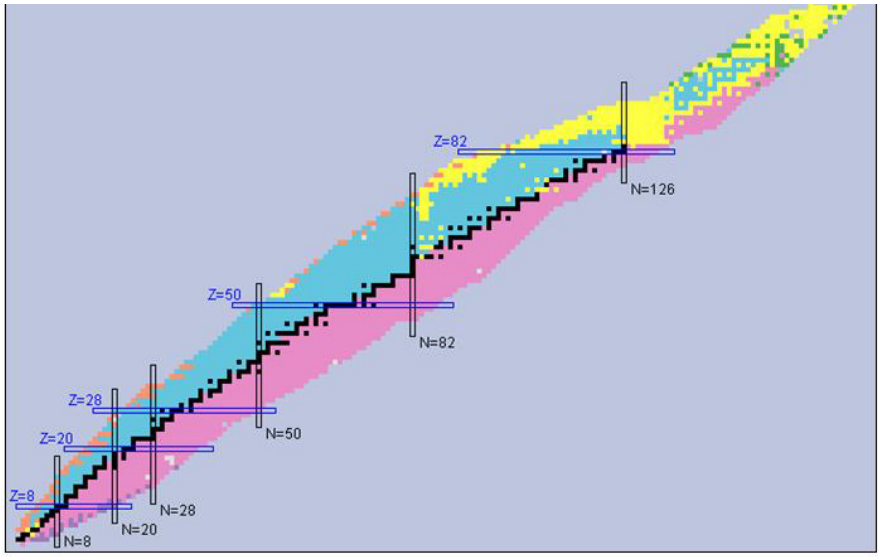


Figura 7. Tipo de producto de decaimiento natural.

Con la siguiente leyenda se pueden apreciar los productos de decaimiento.

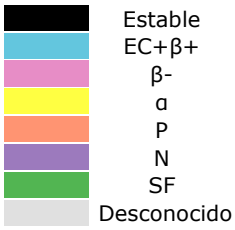


Figura 8. Leyenda de la Figura 7.

En una figura análoga, se representan, para cada isótopo de todos los elementos, el rango en que varían sus tiempos de decaimiento:

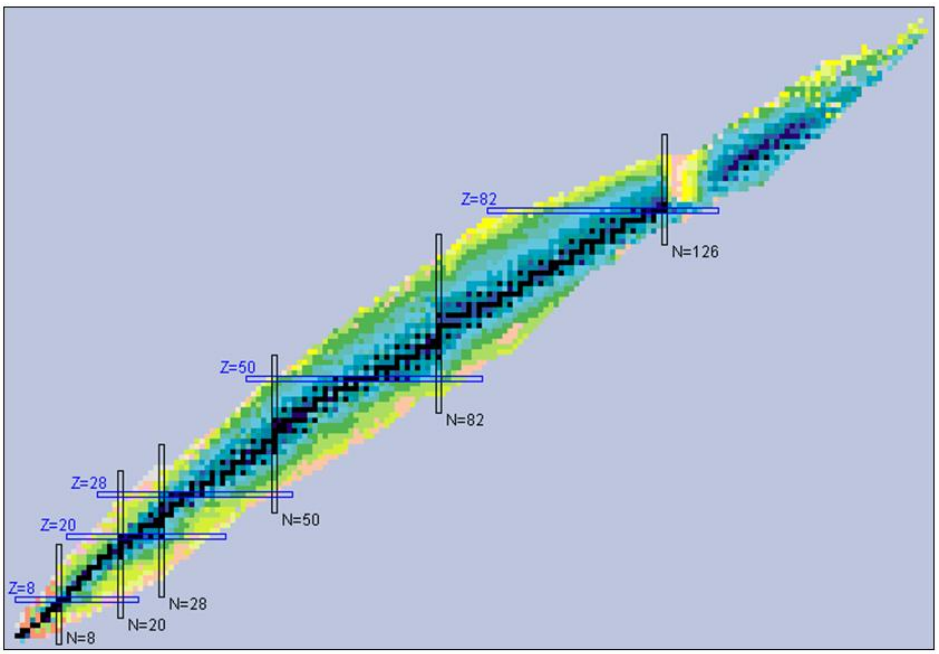


Figura 9. Rango en que varían los tiempos de decaimiento.

con la siguiente leyenda

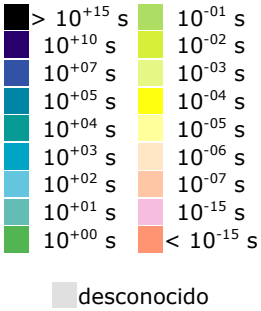


Figura 10. Leyenda de la Figura 9

Pasamos a continuación a ver las características más importantes de cada uno de estos productos.

3.4.2.1. Partículas α.

Las partículas alfa, se emiten durante el decaimiento de especies radioactivas que se encuentran en la naturaleza.

Habitualmente, no se emiten como el resultado del decaimiento originado en los procesos de activación por neutrones, excepto:

- Cuando el proceso de activación da lugar a un nucleido de la cadena de decaimiento natural, por ejemplo, 235U que decae a 231Th con la emisión de una partícula α.

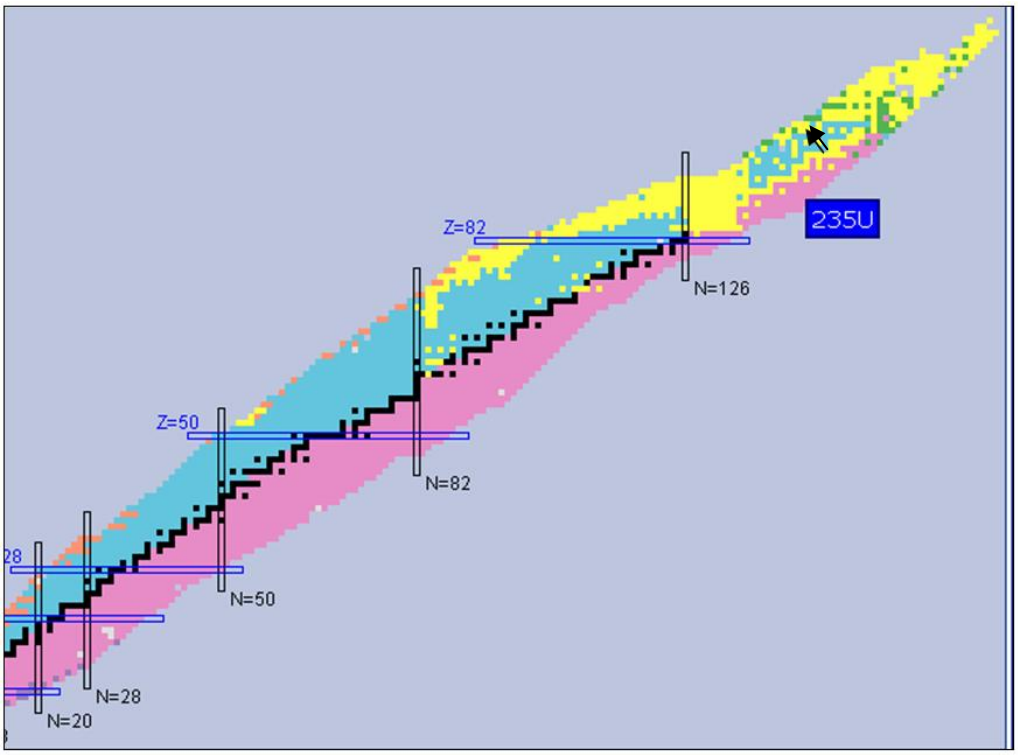


Figura 11. Decaimiento alfa.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{235}_{92}U$	0	7/2-	703.8E+6 y	α: 100	4678.7	$^{231}_{90}Th$

Tabla 10. Decaimiento α del ^{235}U.

- En el caso de las reacciones inducidas por neutrones ante el litio y del boro:
  - 6Li(n,α)3H
  - 10B(n.α)7Li
- donde se emiten partículas alfa instantáneas.

Las partículas alfa son monoenergéticas, y tienen energías en el rango de 2 al 10 MeV.

El recorrido de las partículas alfa es pequeño, por ejemplo, una partícula alfa de 5 MeV, viajará solamente 0,3 mm en sílice. Consecuentemente, antes del contaje, un elemento emisor alfa podría ser aislado químicamente de la matriz de la muestra original y colocado en un soporte de tal manera que pueda ser medido. Por estas razones, las partículas alfa raramente se utilizan en el análisis de activación para la determinación de la concentración elemental.

Las partículas alfa se registran usando un film hecho de nitrato de celulosa, acetato de celulosa, o policarbonato, colocado cerca de contacto con la superficie del material bajo examen. Cuando una partícula alfa se emite crea pistas en el film. El número de pistas registradas indicará la concentración del emisor alfa en la muestra.

3.4.2.2. Partículas β.

Este decaimiento es un proceso que pueden usar los átomos inestables para volverse estables. Las partículas beta son partículas cargadas con carga negativa o con carga positiva. No son monoenergéticas sino que tienen una banda de energía desde cero hasta una energía máxima del rango de 0,1 a 20 MeV, sin embargo la mayoría está por debajo de 10 MeV.

Hay dos tipos de decaimiento β, el β^+ y el β^-.

La mayoría de los núcleos activados con neutrones, decae por medio de la emisión de partículas beta, dando lugar a un elemento hijo que,

[1] β^-: tiene un número atómico una unidad mayor, como en el caso de la emisión β^-. Es decir, uno de los neutrones del núcleo del átomo se transforma en un protón, un electrón y un neutrino. El electrón y el antineutrino escapan del núcleo que entonces tiene un protón más que antes. Por ejemplo, durante un decaimiento β^-, un átomo de carbono con 6 protones, se convierte en un átomo de nitrógeno con 7 protones, como se observa en la Figura 12. Otro ejemplo lo tenemos en las Figura 13 y Figura 14, que muestran el tipo de decaimiento del ^{60}Co que aparece en la Figura 13 en la zona de color rosa que representa a la emisión β^- y en la Tabla 11 se observa que produce ^{60}Ni y emite β^-.

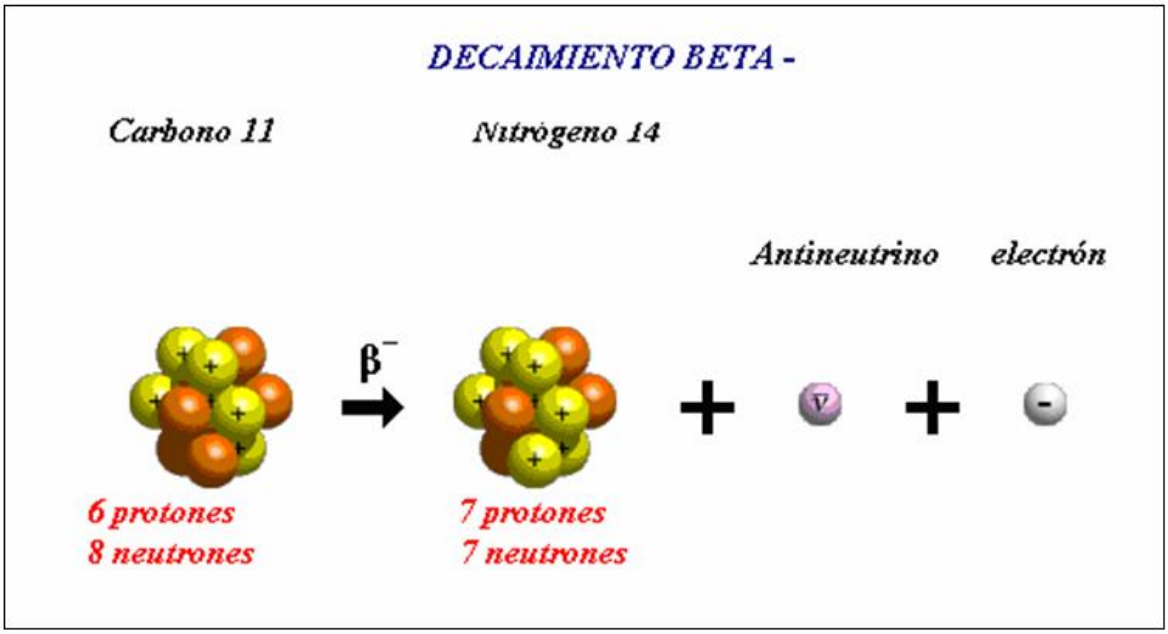


Figura 12. Decaimiento β^- del ^{11}C.

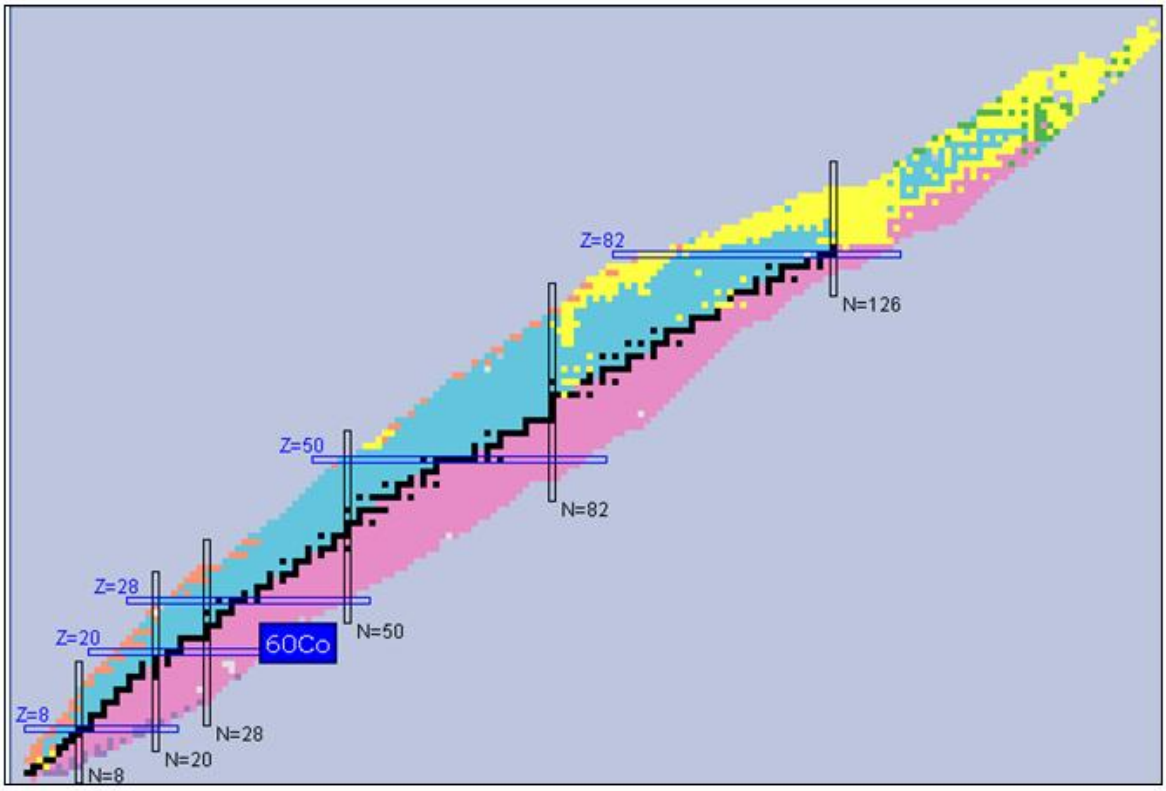


Figura 13. Decaimiento del ^{60}Co con la emisión de una partícula β^-.

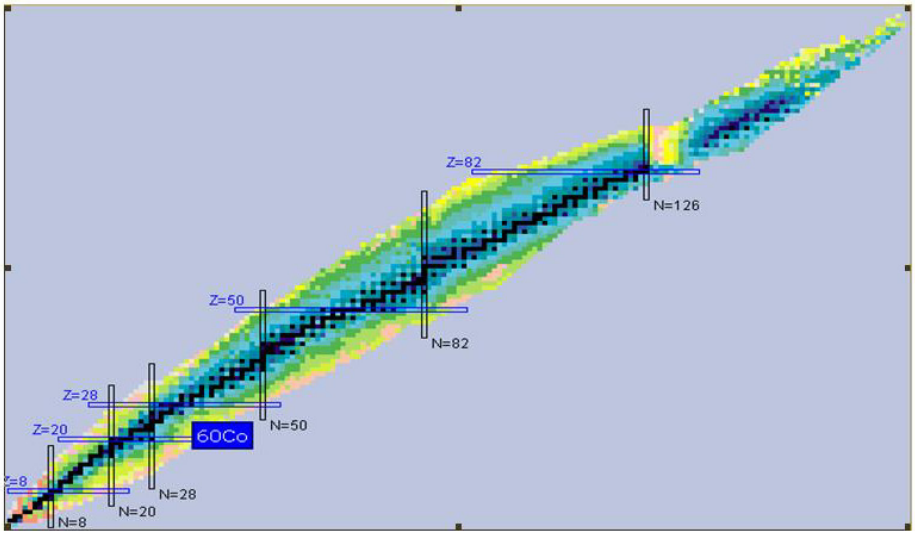


Figura 14. Tiempos de decaimiento del ^{60}Co con la emisión de una partícula.β$^-$.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{60}_{27}$Co	0.0	5+	1925.28 d	β$^-$: 100 %	2823.9	$^{60}_{28}$Ni

Tabla 11. Decaimiento β$^-$ del ^{60}Co.

En la Figura 15 se aprecia el esquema de decaimiento β$^-$ hasta alcanzar el nivel estable.

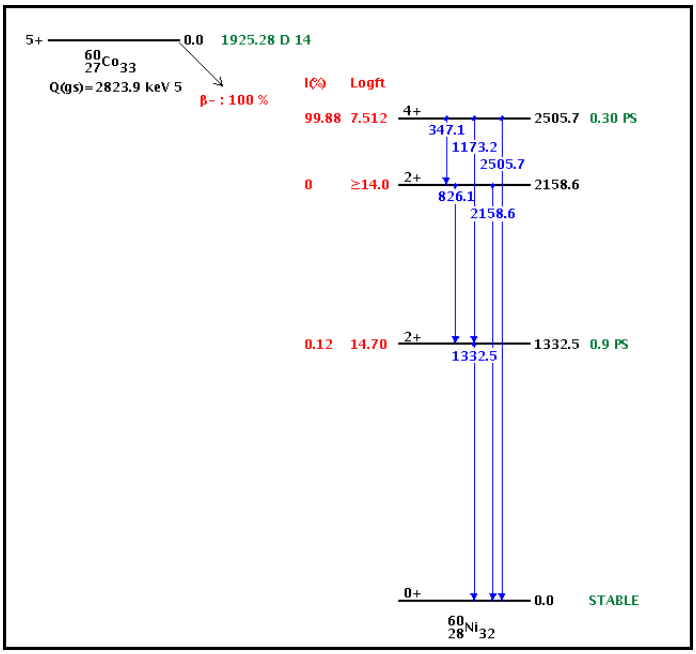


Figura 15. Esquema de decaimiento del ^{60}Co.

[2] β$^+$: Durante este decaimiento, un protón del núcleo del átomo se convierte en un neutrón, un positrón y un neutrino. El positrón y el neutrino escapan del núcleo, el cual queda con un protón

menos que antes, y se transforma en otro elemento. Por ejemplo, durante un decaimiento β^+ un átomo de Carbono (con 6 protones), se convierte en un átomo de Boro con 5 protones (ver Figura 16). En las Figura 17 y Figura 18 se representa el decaimiento del 65Zn, produce 65 Cu y emite β+. En la Tabla 12, se resume su modo de decaimiento, y en la Figura 19 su esquema de decaimiento.

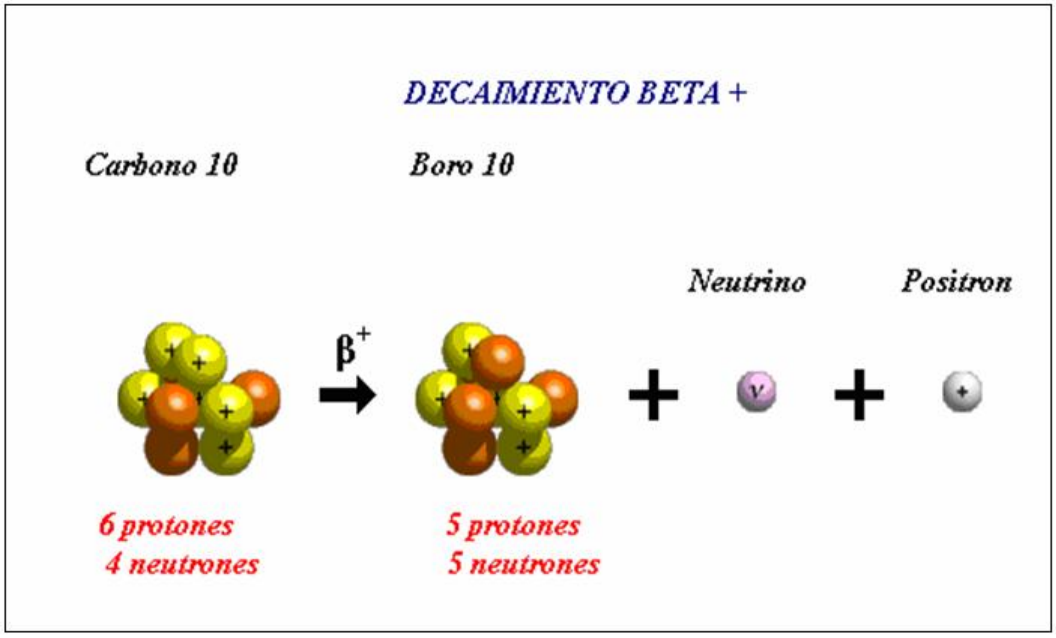


Figura 16. Decaimiento β^+ del 10C.

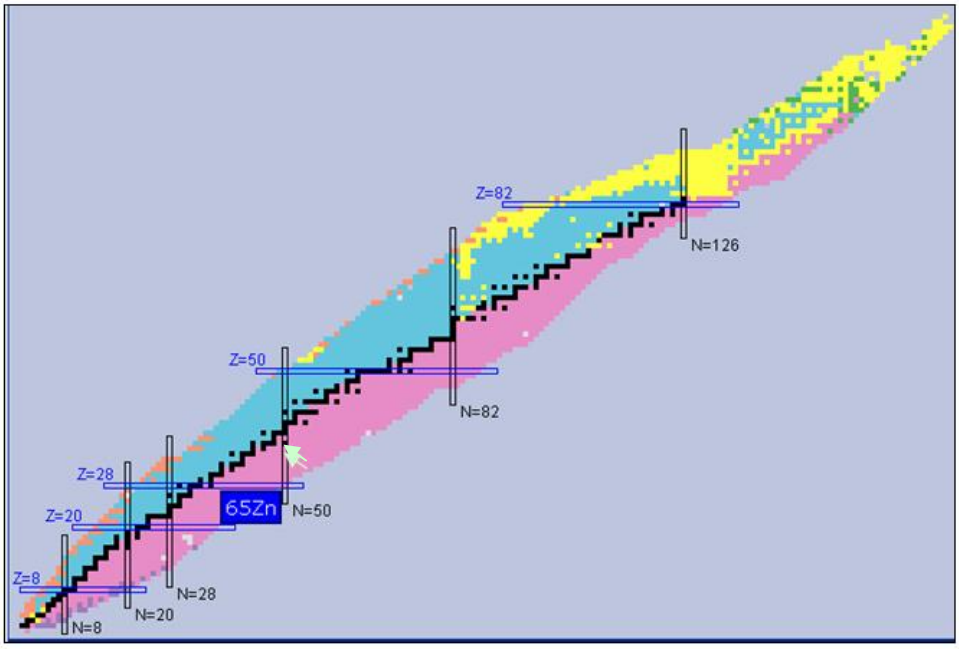


Figura 17. Decaimiento del ^{65}Zn con la emisión de una partícula β^+.

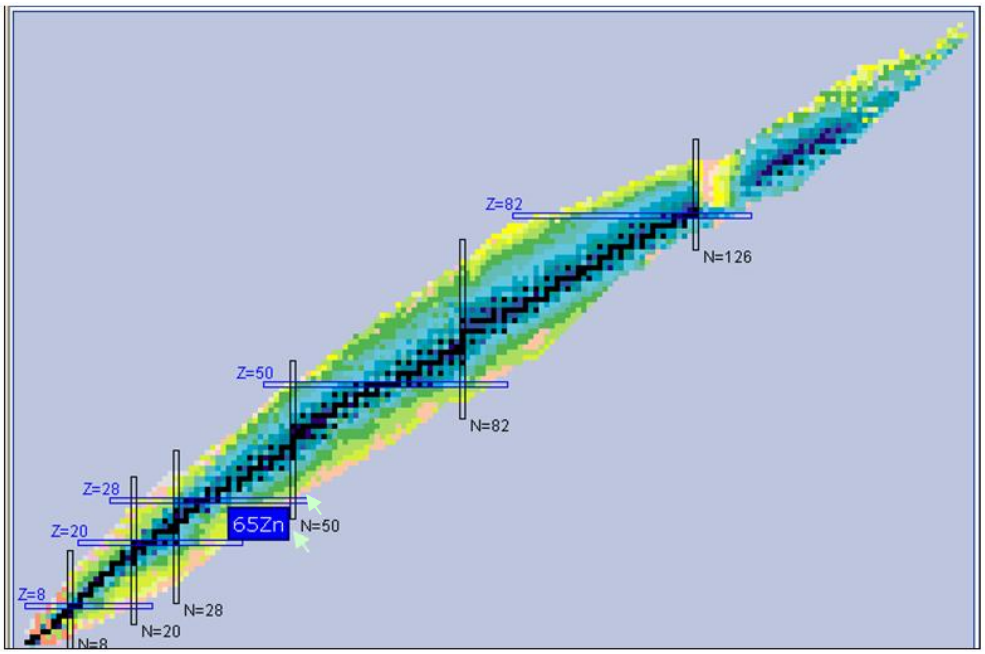


Figura 18. Tiempos de decaimiento del ^{65}Zn.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{65}_{30}$Zn	0	5/2-	244.06 d	ε: 100 %	1350.8	$^{65}_{29}$Cu

Tabla 12. Decaimiento del ^{65}Zn.

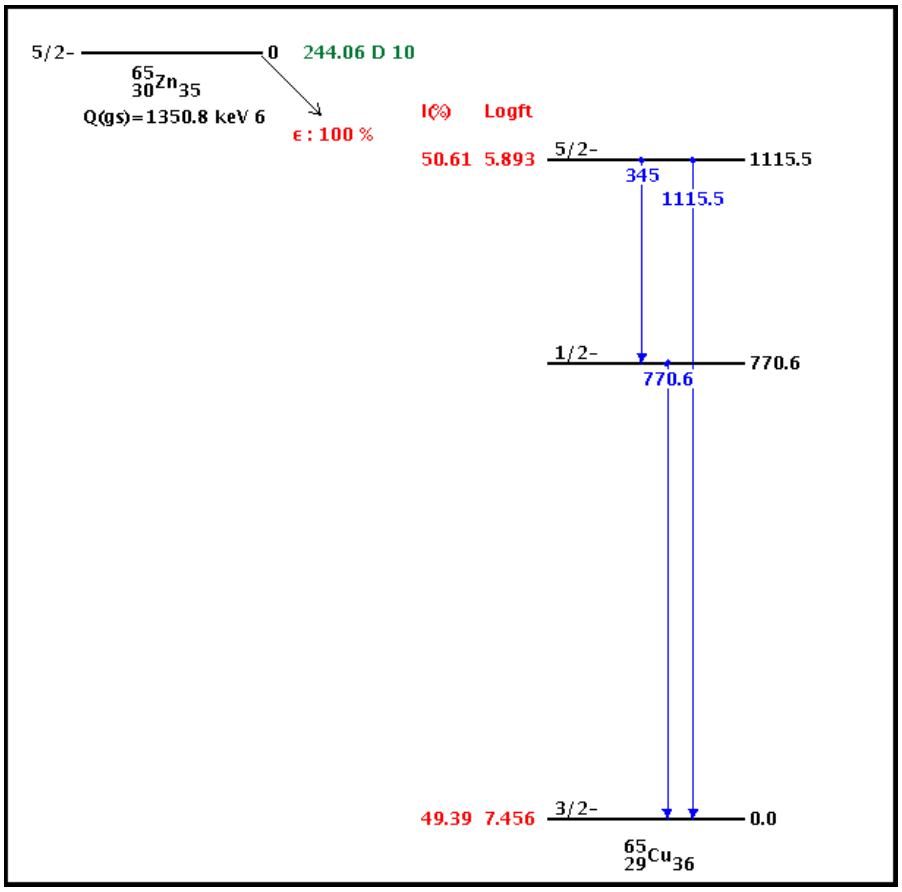


Figura 19. Esquema de decaimiento del ^{65}Zn.

La mayor desventaja es el hecho de que las partículas β emiten en un ancho de banda de energías. Si se tienen varios emisores β en una muestra, van a producir un rango de energías que no van a permitir la identificación de los elementos por energías, sino que habrá que hacer esta identificación basándose en la medida de la vida media o bien habrá que hacer una previa separación de los componentes.

Aunque cambia el número de protones y neutrones en el núcleo del átomo durante un decaimiento β′ el número total de partículas (protones más neutrones) permanece constante.

3.4.2.3. Rayos X.

Se producen como el resultado de una captura de electrones durante el decaimiento de radionucleídos producidos por activación neutrónica o de conversiones internas.

En el caso de captura de electrones, el núcleo captura un electrón de las capas K o L con la producción de un elemento hijo con un número atómico una unidad menor y la emisión de Rayos X característicos del hijo. Por ejemplo, el ^{58} Co decae por captura de electrones y emisión de un positrón β+ para dar ^{58}Fe y los Rayos X característicos del Fe.

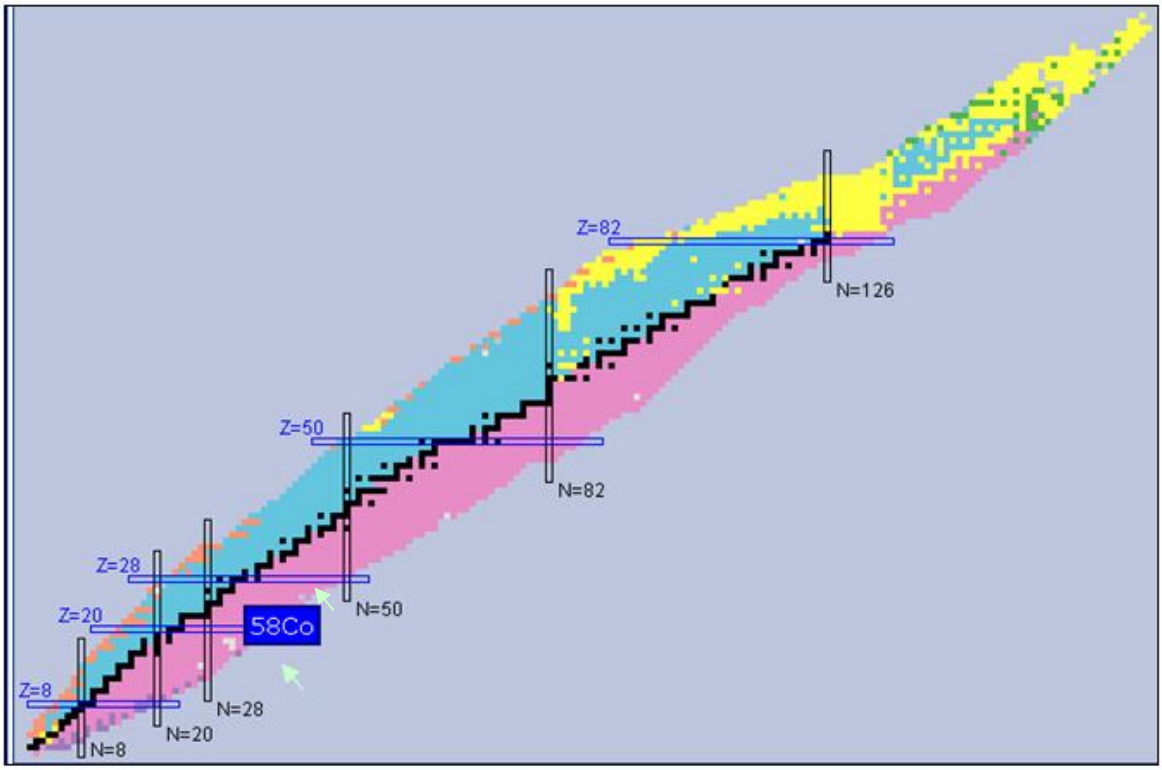


Figura 20. Decaimiento del ^{58} Co.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jn padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{58}_{27}$Co	0.0	2+	70.86 d *6*	ε: 100 %	2307.4 *11*	$^{58}_{26}$Fe

Tabla 13. Decaimiento del ^{58} Co.

- Emisión β^+:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
201.1 *5*	474.6 *11*	14.90 % *20*	0.0300 *4*

Tabla 14. Emisión β^+ del decaimiento del ^{58}Co.

- Emisión de electrones:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	0.67	116.9 % *4*	7.83E-4 *3*
Auger K	5.62	48.8 % *3*	0.002743 *18*
CE K	803.6473 *22*	0.029835 % *3*	2.39768E-4 *24*
CE K	856.839 *6*	1.449E-4 % *21*	1.242E-6 *18*

Tabla 15. Emisión de electrones del decaimiento del ^{58}Co.

- Emisión de radiación Gamma y Rayos X:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	0.7	0.71 % *7*	4.9E-6 *5*
XR kα2	6.391	7.7 % *4*	4.93E-4 *24*
XR kα1	6.404	15.3 % *7*	9.8E-4 *4*
XR kβ3	7.058	0.93 % *5*	6.6E-5 *3*
XR kβ1	7.058	1.82 % *8*	1.28E-4 *6*
Annihil.	511.0	29.8 % *4*	
	810.7593 *20*	99.450 % *10*	0.80630 *8*
	863.951 *6*	0.690 % *10*	0.00596 *9*
	1674.725 *7*	0.520 % *10*	0.00871 *17*

Tabla 16. Emisión Gamma y de Rayos X en el decaimiento del ^{58} Co.

3.4.2.4. Conversión interna.

La conversión interna ocurre cuando se emite un Rayo γ desde un núcleo. Este rayo interacciona con un electrón orbital produciendo una conversión electrónica emitiendo Rayos X característicos del padre. El porcentaje de conversión interna es, a menudo, alto para las transiciones isoméricas: por ejemplo, el decaimiento del ^{60m} Co, a ^{60}Co, produce Rayos γ de 59 keV que interaccionan con electrones de la capa K dando lugar a Rayos X característicos. En las Figura 21 y Figura 22 se representa el decaimiento del 60Co y en las Tabla 17 y Tabla 18 sus características de decaimiento.

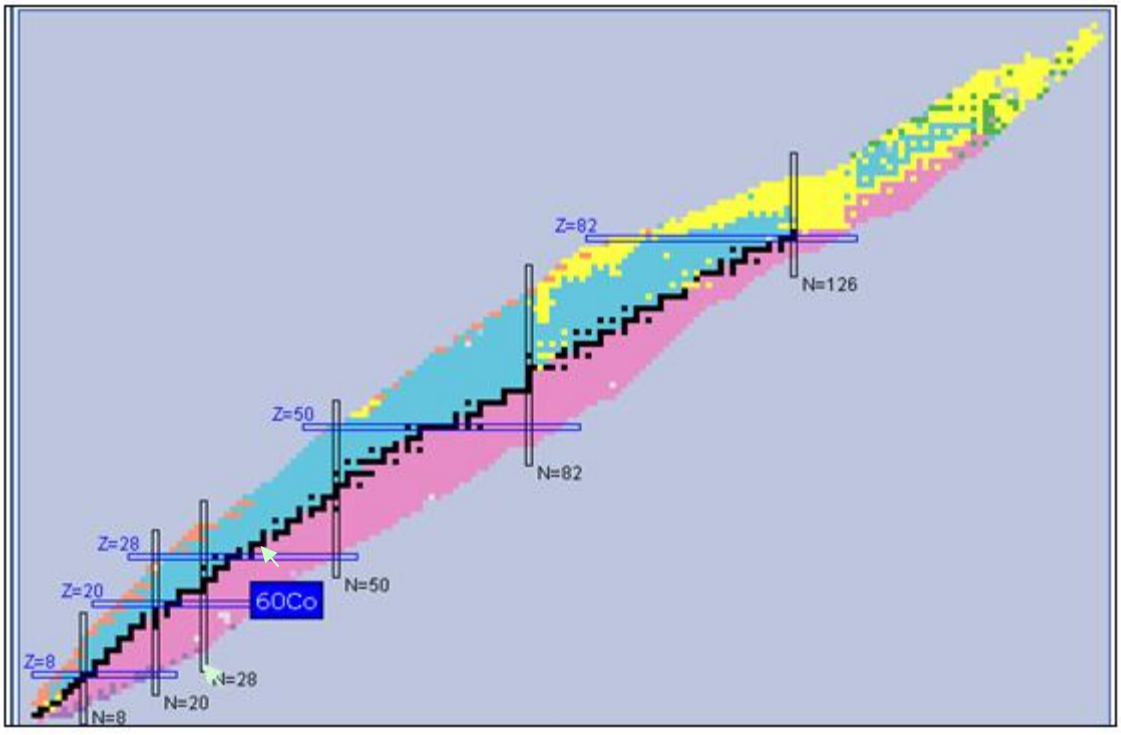


Figura 21. Decaimiento del ^{60}Co.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jn padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{60}_{27}Co$	58.603 7	2+	10.467 m 6	IT		$^{60}_{27}Co$

Tabla 17.Decaimiento del ^{60}Co.

- Emisión de radiación Gamma y Rayos X.

Energía(keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
58.603 7	2.0359 %	0.0011931

Tabla 18. Emisión de Gamma y de Rayos X en el decaimiento del ^{60}Co.

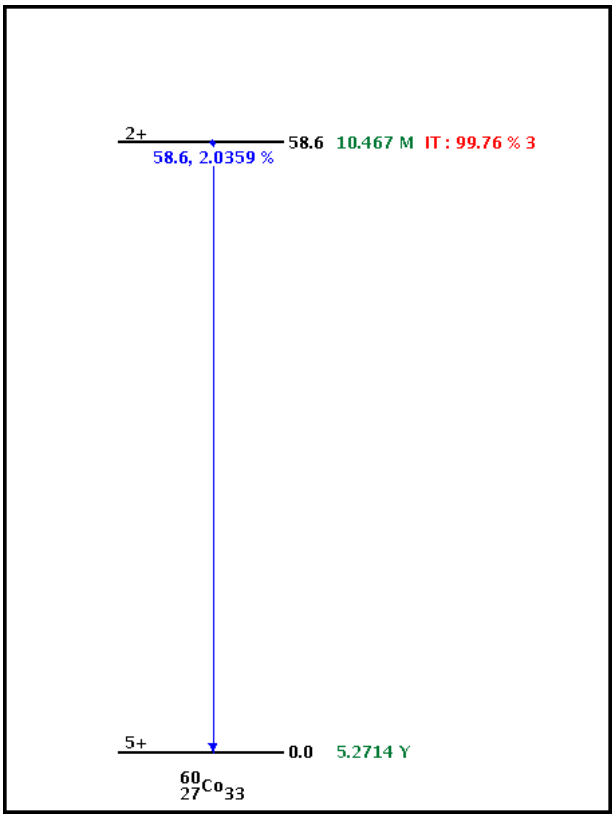


Figura 22. Esquema de decaimiento del ^{60}Co.

Los Rayos X producidos durante esos procesos de decaimiento pueden utilizarse en los análisis de activación neutrónica para medir elementos. Al ser monoenergéticos, son útiles para análisis multielemental. El principal problema del contaje de Rayos X está asociado con las interferencias procedentes de otros procesos, como Rayos X secundarios debidos a fluorescencia, radiación de fondo alta debido a partículas β y absorción en la matriz. Esto último es el mayor inconveniente para analizar muestras gruesas, ya que el efecto de atenuación de Rayos X de energías hasta 100 keV es bastante grande. Este defecto se puede obviar usando muestras delgadas.

3.4.2.5. Rayos γ.

Se producen como resultado de una transición entre niveles excitados de un núcleo.

Los Rayos γ pueden ser el resultado de la absorción de un neutrón durante una activación, o pueden producirse de forma diferida respecto a la activación, cuando decae un elemento radiactivo.

El espectro de Rayos γ tiende a ser bastante complejo y a tener Rayos γ de alta energía, (superior a 6 MeV).

Los Rayos γ diferidos se emiten durante el decaimiento del núcleo padre, y normalmente, proceden de un decaimiento β. Por eso, tienen la vida media característica del padre. Las transiciones son entre niveles de energía del elemento hijo, y, por tanto, puede haber un número de líneas de Rayos γ diferentes. Cada fotón tiene una energía característica bien definida, y se pueden producir varias energías de transición por cada desintegración. El rango de energía típico está entre 0,05 y 4 MeV.

3.4.2.6. Emisión de neutrones.

La emisión de neutrones es otro de los procesos que puede usar un átomo inestable para volverse más estable. Durante la emisión de neutrones se expulsa un neutrón del núcleo del átomo. Ya que el número de protones en un átomo no está cambiando en este proceso, el elemento no está cambiando a otro, sin embargo, se está convirtiendo en un isótopo del elemento. Por ejemplo, bajo las condiciones de emisión de neutrones, un átomo de Berilio 13 (con 9 neutrones), se convierte en un átomo de Berilio 12 (con 8 neutrones). (Figura 23)

Cuando un material fisionable se activa con neutrones para producir la fisión, se producen productos de fisión de vida corta de hasta 54 s. Estos productos son muy inestables, y algunas veces decaen con la emisión de un neutrón. Esos neutrones diferidos permiten una técnica de medida específica para estos materiales fisionables. Este método se aplica, en particular, para la determinación del uranio en muestras de mineral.

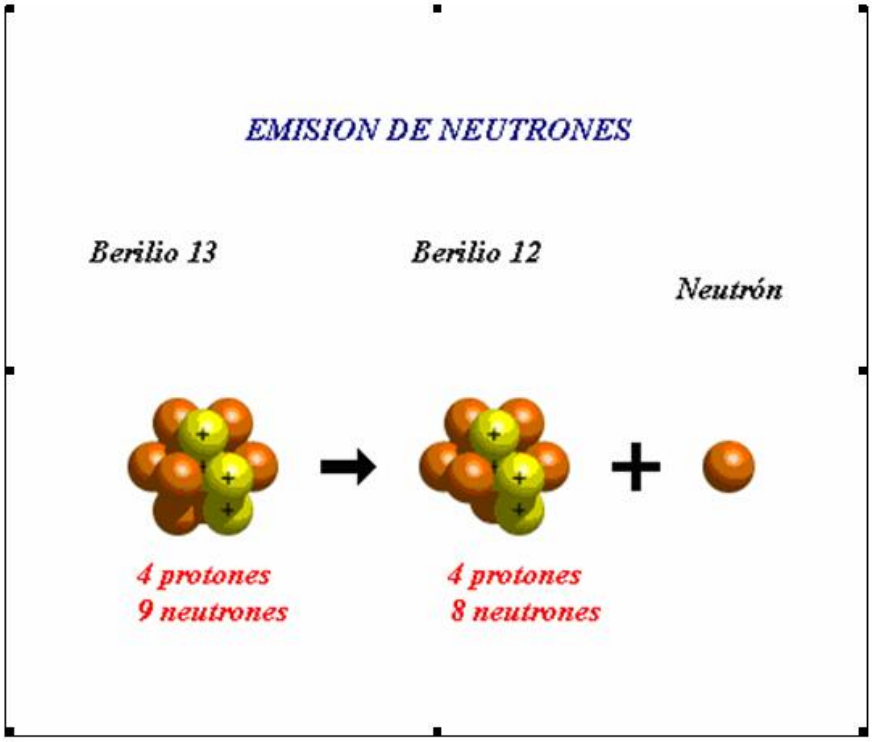


Figura 23. Emisión de neutrones.

3.4.2.7. Emisión de protones.

Durante la emisión de protones, se arroja un protón del núcleo del átomo. Como el átomo pierde un protón, cambia de ser un elemento a otro. En la Figura 24 se observa como a través de un proceso de emisión de neutrones, el Nitrógeno 11 (con 7 protones), se convierte en un átomo de Carbono 10, con 6 protones.

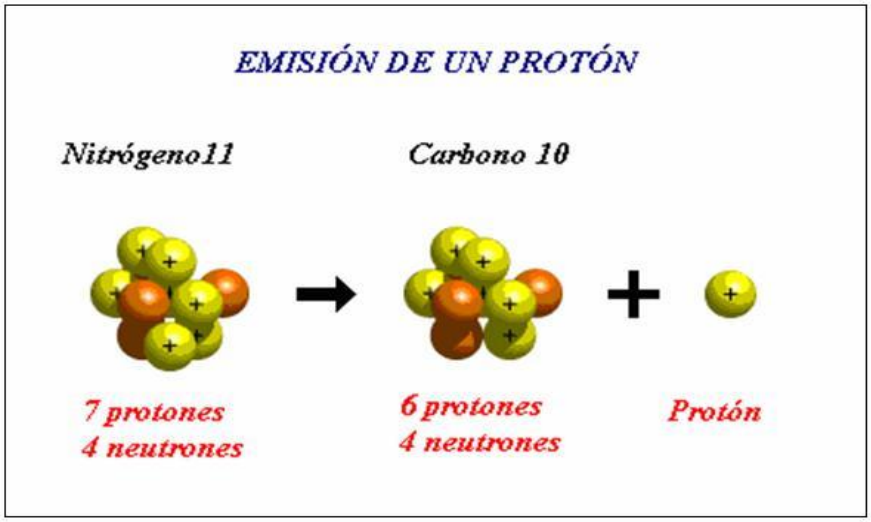


Figura 24. Emisión de protones.

3.4.2.8. Captura de electrones.

Durante el proceso de captura de electrones, el núcleo captura un electrón de una capa interna de un átomo y en el núcleo, el electrón se combina con un protón formando un neutrón y un neutrino. El neutrino se expulsa del núcleo del átomo.

Como el átomo pierde un protón durante la captura de electrones, cambia de ser un elemento a otro. Por ejemplo, en la Figura 25 se observa como tras la captura de un electrón, un átomo de carbono 11, con 6 protones, se convierte en un átomo de boro con 5 protones.

Como el número de protones y neutrones en el núcleo del átomo cambia durante la captura de electrones, el número total de partículas, protones y neutrones permanece constante.

La captura de electrones se llama también captura K ya que el electrón capturado suele provenir de esta capa.

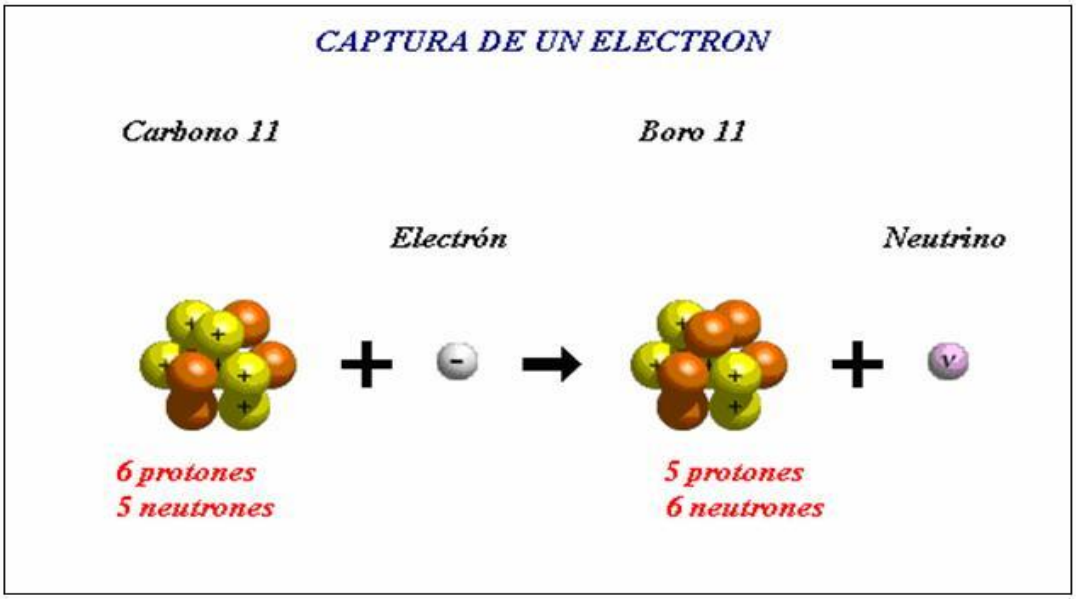


Figura 25. Captura de electrones.

3.4.3. Análisis de los esquemas de decaimiento.

Los esquemas de decaimiento de los radionucleídos ilustran el modo de decaimiento y la naturaleza de la radiación emitida durante el decaimiento o retorno al estado estable de un elemento.

Para que un nucleido se pueda analizar por métodos de activación neutrónica deberá tener unas características de decaimiento específicas.

La forma en la cual decae una especie radiactiva, se representa mediante su esquema de decaimiento, como ya se ha observado anteriormente. Los esquemas de decaimiento de los radionucleídos ilustran el modo de decaimiento y la naturaleza de la radiación emitida durante el mismo. También proporcionan información cuantitativa acerca

de la cantidad de radioactividad que se puede originar en cada desintegración.

A continuación se exponen algunos ejemplos de decaimiento desde el caso más sencillo hasta casos más complejos.

3.4.3.1. Decaimiento β sin líneas de transición de Rayos Gamma.

Como ejemplo tenemos el esquema de decaimiento del ^{35}S, (que se produce por activación neutrónica del ^{34}S). Es un emisor β^- puro y decae con una vida media de 88 días hasta el hijo estable. Tabla 19. El hijo producido, el ^{35}Cl, como resultado de la emisión β tiene un protón más que el precursor. Como no existen líneas de Rayos γ (Figura 26), solo es posible medir el contenido en azufre, con la actividad β, de 0,167 MeV.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{35}_{16}S$	0	3/2+	87.51 d	β^-: 100 %	167.14	$^{35}_{17}Cl$

Tabla 19. Decaimiento del ^{35}S.

- Emisión β^-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
48.63 *7*	167.14 *8*	100 %	0.0486

Tabla 20. Emisión β^- del ^{35}S.

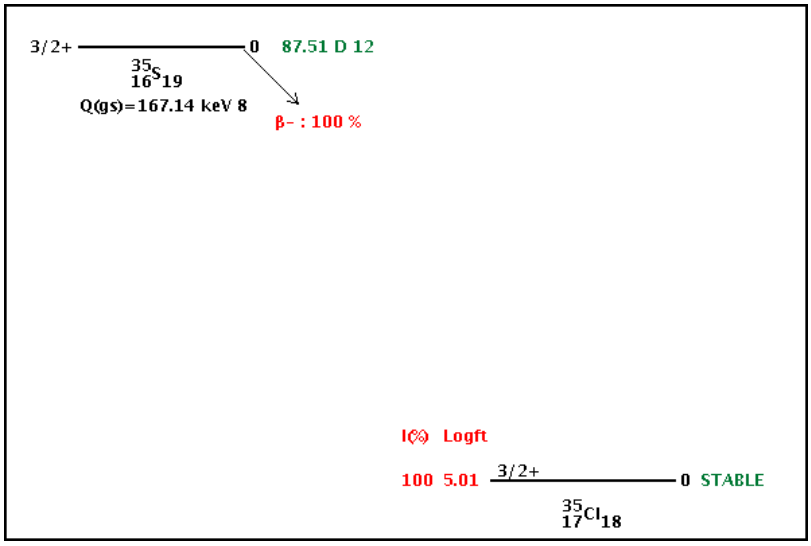


Figura 26. Esquema de decaimiento del ^{35}S.

3.4.3.2. Decaimiento β involucrando una transición de Rayos γ.

Como ejemplo, se observa el decaimiento del ^{28}Al producido como resultado de la reacción ^{27}Al(n.γ). En este caso, el decaimiento del ^{28}Al, que tiene una vida media de 2,24 minutos, (Tabla 21) es a través de la emisión de partículas β, con un máximo de energía de 2,862 MeV, (Tabla 22) hasta un nivel de energía del elemento hijo, ^{28}Si (energía del punto final).

La transición γ al estado estable del elemento hijo, da lugar a la emisión de un rayo γ con una energía de 1,77885 MeV (Figura 27 y Tabla 23). La vida media del estado de transición es solamente 0,5 ps, por lo que se puede decir, que el decaimiento se hace a la velocidad que marca la vida media del ^{28}Al.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{28}_{13}$Al	0.0	3+	2.2414 m	β^-	4641.8	$^{28}_{14}$Si

Tabla 21. Decaimiento del ^{28}Al.

- Emisión β-:

Energía (keV)	Energía Punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1247.2 *3*	2862.9	99.990 %	1.24708

Tabla 22. Emisión β- del decaimiento del ^{28}Al.

- Emisión Gamma y Rayos X.:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1778.85	100 %	1.77885

Tabla 23. Emisión γ y Radiación X del decaimiento del ^{28}Al.

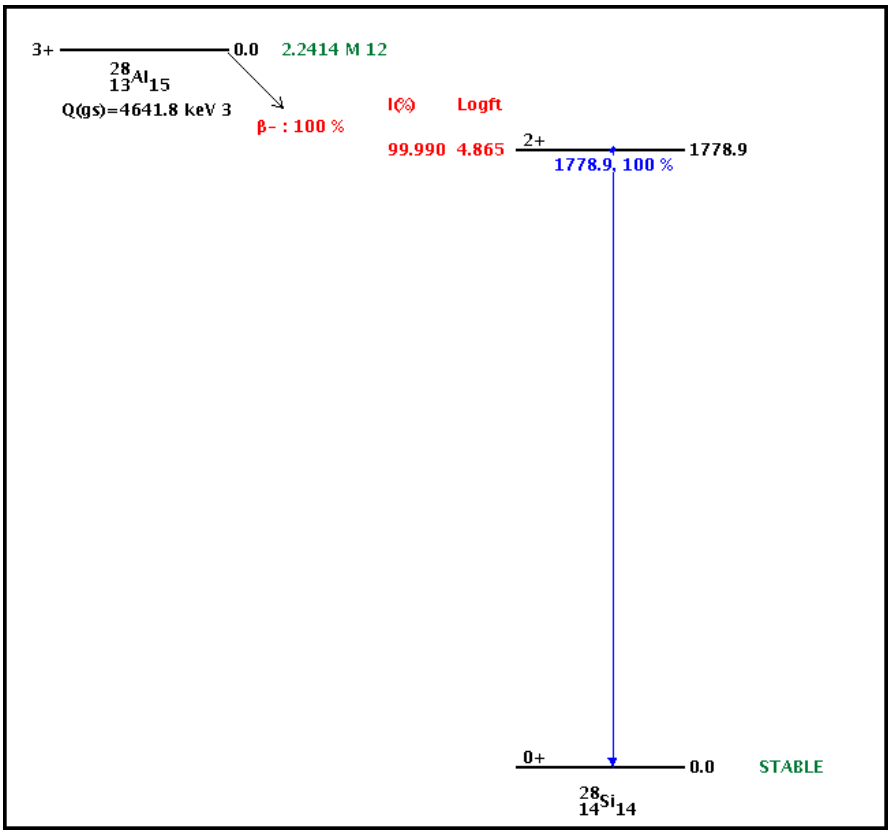


Figura 27. Esquema de decaimiento del ^{28}Al.

3.4.3.3. Decaimiento complejo.

La mayoría de los decaimientos son más complejos de lo que se ha mostrado anteriormente. Como ejemplo, se va a analizar la activación del ^{45}Sc que da lugar a ^{46m}Sc y ^{46}Sc.

- El ^{46m}Sc de vida corta es el nivel energético que decae por transición isomérica con la emisión de un Rayo γ con una energía de 142,5 keV. Esta estará acompañada por una conversión interna, y la emisión de unos Rayos X característicos del Sc. (Figura 28)

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{46}_{21}$Sc	142.528	1-	18.75 s	IT: 100 %		$^{46}_{21}$Sc

Tabla 24. Decaimiento del ^{46m}Sc.

- Emisión de electrones:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	0.37	56.56 %	2.093E-4
Auger K	3.64	26.87 %	9.78E-4
CE K	138.035	33.4 %	0.0461
CE L	142.028	3.40 %	0.00483

Tabla 25. Emisión de electrones de ^{46m}Sc.

- Emisión de rayos Gamma y Rayos X:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	0.4	0.11 %	4.5E-7
XR kα2	4.086	1.90 %	7.8E-5
XR kα1	4.091	3.78 %	1.54E-4
XR kβ3	4.461	0.207 %	9.2E-6
XR kβ1	4.461	0.408 %	1.82E-5
	142.528	62.0 %	0.088

Tabla 26. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del ^{46m}Sc.

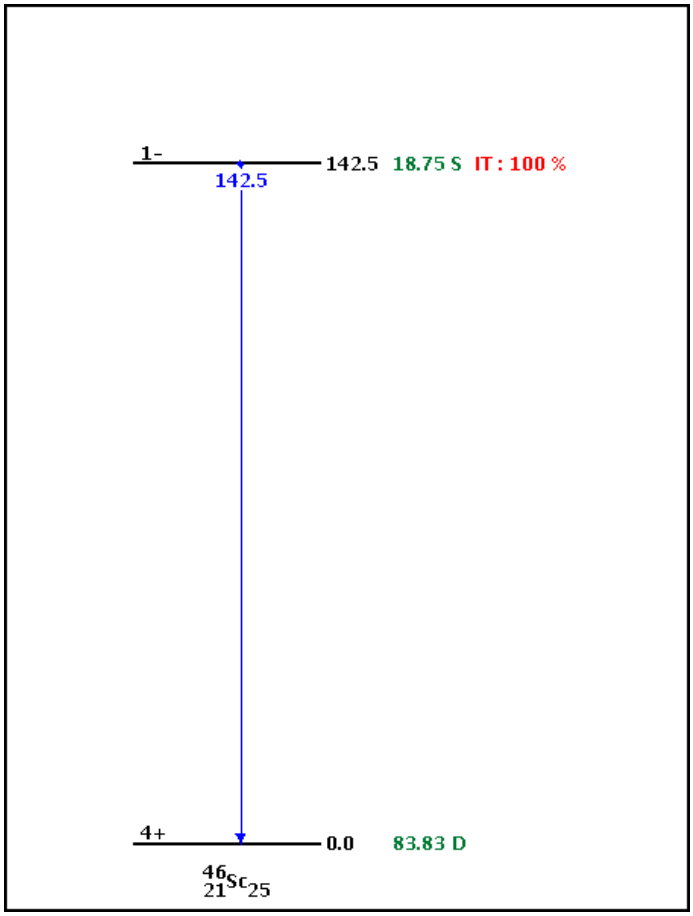


Figura 28. Esquema de decaimiento del ^{46m}Sc.

- El ^{46}Sc decae con una emisión β casi completamente al nivel de energía de 2,01 MeV que da lugar a la emisión de un Rayo γ de 1,12 MeV, al que le sigue una emisión de un rayo γ de 0,889 MeV, que se produce al decaer hasta el estado estable del ^{46}Ti. (Figura 29)

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{46}_{21}$Sc	0.0	4+	83.79 d *4*	β^-: 100 %	2366.7 *7*	$^{46}_{22}$Ti

Tabla 27. Decaimiento del ^{46}Sc.

- Emisión β^-.

Energía (keV)	Energía Punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
111.8 *3*	356.9 *7*	99.9964 % *7*	0.1117960 *8*
580.8 *4*	1477.4 *7*	0.0036 % *7*	2.1E-5 *4*

Tabla 28. Emisión β^- del decaimiento del ^{46}Sc.

- Emisión de rayos Gamma y Rayos X:

Energía(keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
889.277 *3*	99.9840 % *10*	0.889135 *9*
1120.545 *4*	99.9870 % *10*	1.120399 *12*
2010	1.3E-5 % *10*	2.6E-7 *20*

Tabla 29. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del ^{46}Sc.

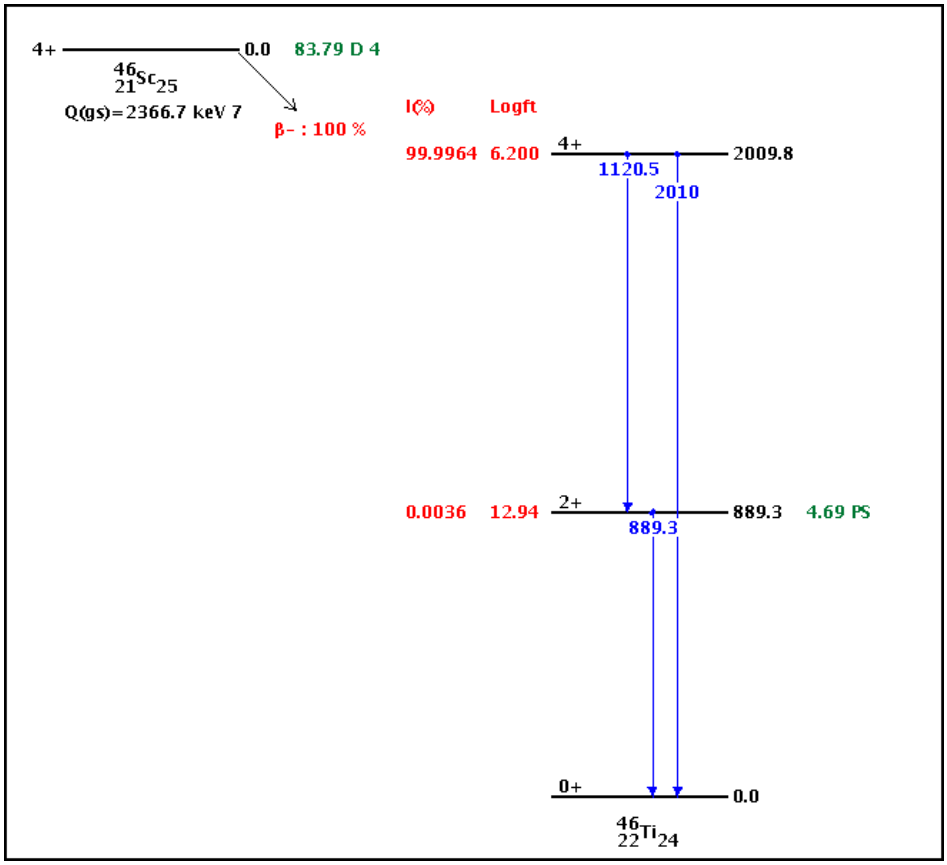


Figura 29. Esquema de decaimiento del ^{46}Sc.

3.4.3.4. Decaimiento por la emisión de un positrón y la captura de un electrón.

El decaimiento del 65Zn, producido por la reacción 64 Zn (n,γ) es un ejemplo de este tipo de decaimiento. El decaimiento a través del nivel de energía con emisión de un rayo γ, origina un hijo estable, con un protón menos que el precursor, el 65Cu. Tabla 30.

Se emiten tres Rayos γ con energías de 345, 771 y 1115 keV. Tabla 33.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jn padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{65}_{30}$Zn	0	5/2-	244.06 d *10*	ε: 100 %	1350.8 *6*	$^{65}_{29}$Cu

Tabla 30. Decaimiento del ^{65}Zn.

- Emisión β^-.

Energía (keV)	Energía Punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
143.01 *13*	328.8 *6*	1.420 % *20*	0.00203 *3*

Tabla 31. Emisión β- del decaimiento del ^{65}Zn.

- Emisión de electrones:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	0.92	126.7 %	0.001166
Auger K	7.03	47.5 %	0.00334
CE K	761.66	1.02E-6 %	7.8E-9
CE K	1106.5601	0.0084 %	9.3E-5

Tabla 32. Emisión de electrones de ^{65}Zn.

- Emisión de rayos Gamma y Rayos X:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	0.93	1.24 %	1.15E-5
XR kα2	8.028	11.6 %	9.3E-4
XR kα1	8.048	22.6 %	0.00182
XR kβ3	8.905	1.38 %	1.23E-4
XR kβ1	8.905	2.70 %	2.40E-4
	344.95	0.0030 %	1.03E-5
Annihil.	511.0	2.84 %	
	770.64	0.0030 %	2.31E-5
	1115.539	50.60 %	0.5645

Tabla 33. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del ^{65}Zn.

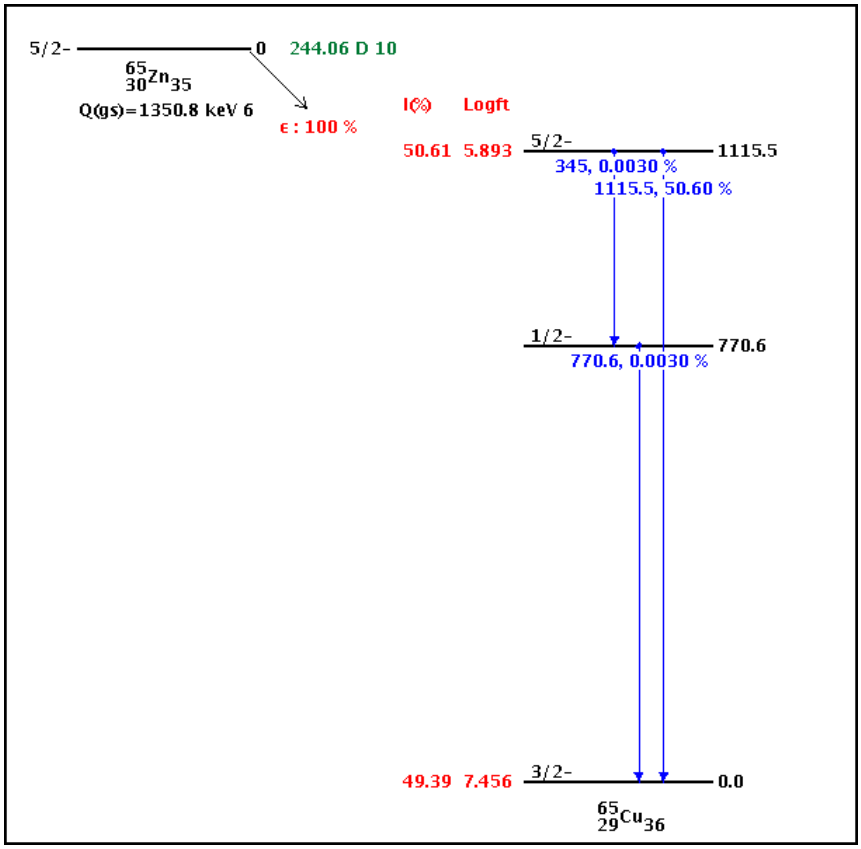


Figura 30. Esquema de decaimiento del ^{65}Zn.

Finalmente, hay que dejar constancia de que algunos elementos hijo, se pueden producir por el decaimiento de dos precursores diferentes, compartiendo las mismas transiciones γ en los niveles de energía de los hijos mutuos. Un ejemplo de esto se produce en los esquemas de decaimiento del 153Sm y del 153Gd, que tienen los rayos gamma producidos como resultado de transiciones entre niveles de energía del 153Eu.

3.4.3.5. Relación de ramificación.

Los esquemas de decaimiento también proporcionan información cuantitativa acerca de la cantidad de radioactividad que se puede originar en cada desintegración. La proporción de emisión β y γ están en una relación fijadas por la probabilidad de las distintas transacciones.

Por ejemplo, el esquema de decaimiento del 198Au muestra la desintegración por emisión β (Figura 32) a tres diferentes niveles de energía de decaimiento. (Indicados como I% en números rojos).

- De las desintegraciones al producto estable hijo, el 0,025% son por β-, la cual se emite con una energía máxima en 1371 keV.
- La mayoría de las desintegraciones, (98,99%), se producen con una energía máxima de 960 keV al nivel de energía de 411,8 keV del 198Hg, seguido de una emisión γ al estado estable.
- El 0,985% de las desintegraciones, se producen como consecuencia de una emisión β- con una energía máxima de 290 keV al nivel de energía de 1087,7 keV del 198Hg.

Las transacciones γ desde el nivel 1087,7 keV siguen uno de estos caminos:

- 15,9% pasan al estado estable, con una emisión de un rayo γ de 1087,7 keV, y
- 80,4% pasan al nivel 411,8 keV con emisión de un rayo γ de 675,9 keV.
- Todas las transiciones desde el nivel 411,8 hasta el nivel base, se realizan con la emisión de rayos γ de 411,8 keV.

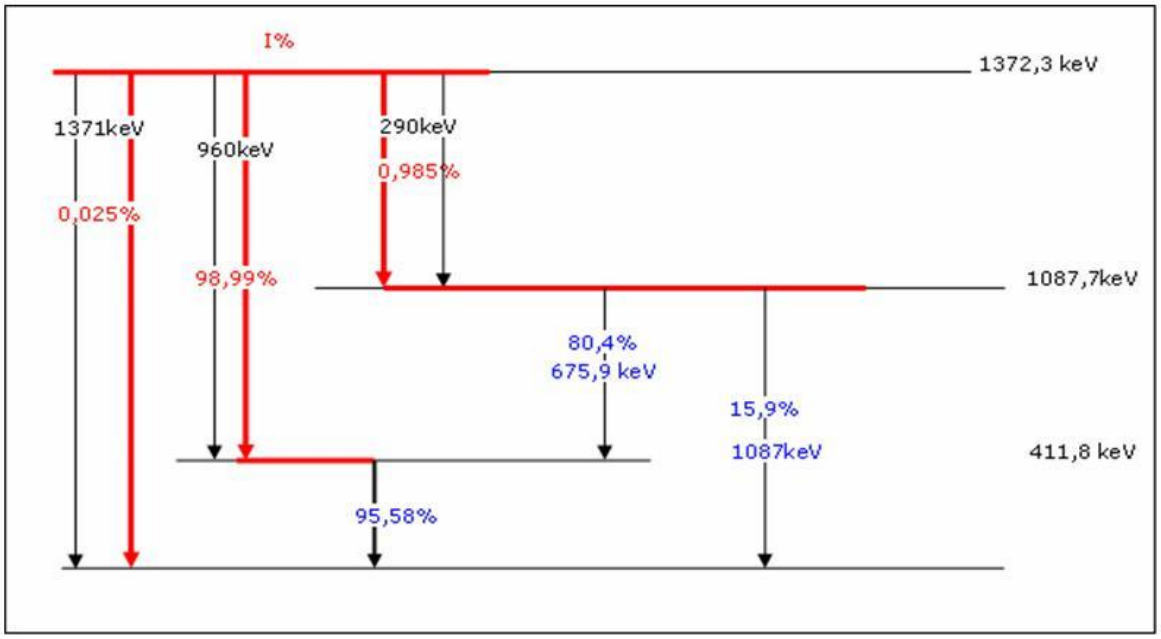


Figura 31. Esquema de decaimiento del 198Au.

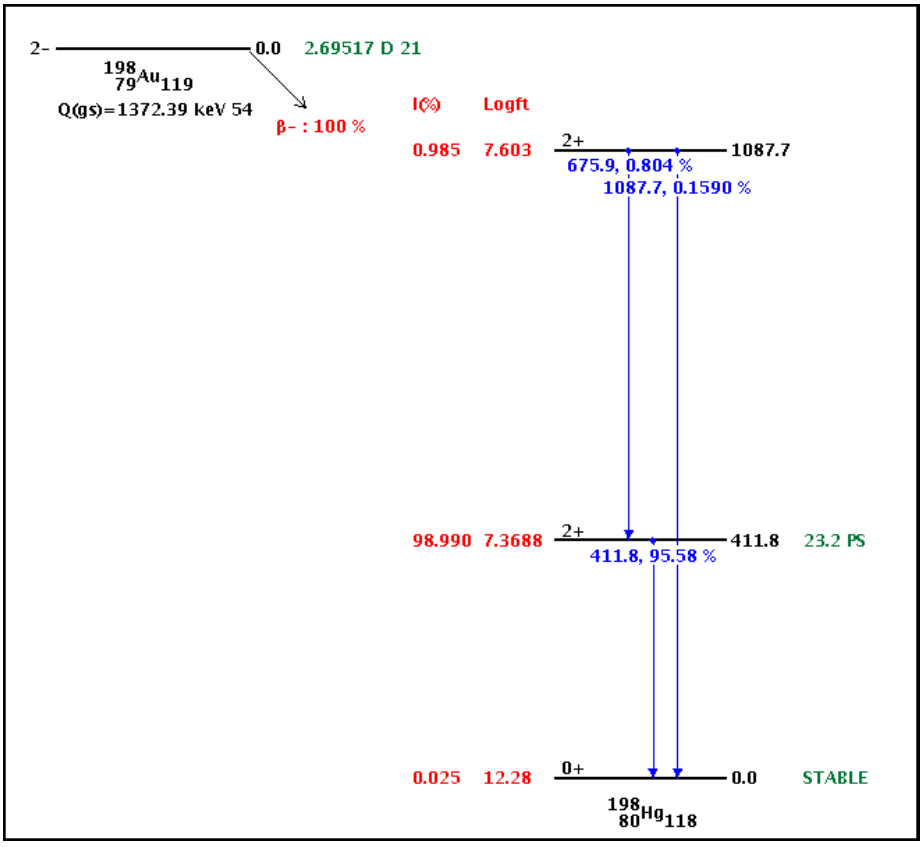


Figura 32. Esquema de decaimiento del ^{198}Au.

La proporción de los distintos Rayos γ producidas por la desintegración de un núcleo se llama relación de ramificación.

El esquema de decaimiento del 198Au, por ejemplo, permite calcular los rayos γ originados a causa de la desintegración de los Rayos γ desde el nivel de energía de 0,0418 MeV de la siguiente forma:

- Por una parte, por cada 100 desintegraciones β-, 0,025 pasan al estado estable.
- Hay 0,985 desintegraciones que pasan al estado de energía de 1,0877 MeV, pero, de éstas, como se ha dicho anteriormente:
  - El 15,9% de 0,985 (0,1566 por cada 100 desintegraciones), decaen hasta el nivel estable, con la emisión de 1087,7 MeV.
  - El 80,4% de 0,985 (0,791 por cada 100 desintegraciones), decaen con la emisión de un Rayos γ de 0,6759 MeV hasta el nivel de 0,4118 MeV.
- La mayoría de las transiciones β-(98,99%), van también al estado de energía de 0,4118.

Así, por cada 100 desintegraciones,

- en el nivel de energía de 0,4118, hay
  - 98,99 desintegraciones (que pasan directamente)
  - más
  - 80,4*0,985 = 0,791 que proceden de los niveles superiores,
- es decir, 99,78 desintegraciones que producirán Rayos γ.

Por ello, las intensidades de los porcentajes de las transiciones, son:

- 99,78% en 0,4118 MeV
  - De estas, previamente 0,791% de desintegraciones emitieron Rayos γ de una energía 0,6759 MeV
- 0,159* 0,985= 0,148 % en 1087,7 MeV

Una pequeña proporción de las transiciones desde 0,4118 MeV al estado estable son emisiones de conversión de electrones.

Un caso interesante es el del $^{60}_{27}Co$ que se muestra en la figura siguiente, en el que se observan dos líneas principales de transiciones de Rayos γ en cascada, por lo que se producen un total de unos 200 Rayos γ por cada 100 desintegraciones β.

Núcleo padre	Nivel energía padre	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{60}_{27}$Co	0.0	5+	1925.28 d	β^-: 100 %	2823.9	$^{60}_{28}$Ni

Tabla 34. Desintegración del ^{60}Co.

- Emisión de rayos Gamma y Rayos X:

Energía(keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	0.85	3.10E-4	2.64E-9
XR kα2	7.461	0.00325 %	2.42E-7
XR kα1	7.478	0.0064 %	4.8E-7
XR kβ3	8.265	3.94E-4 %	3.26E-8
XR kβ1	8.265	7.7E-4 %	6.3E-8
	347.14	0.0075 %	2.60E-5
	826.10	0.0076 %	6.3E-5
	1173.228	99.85 %	1.1715
	1332.492	99.9826 %	1.332260
	2158.57	0.00120 %	2.6E-5
	2505.692	2.0E-6 %	5.0E-8

Tabla 35. Emisión de rayos Gamma y Rayos X del ^{60}Co.

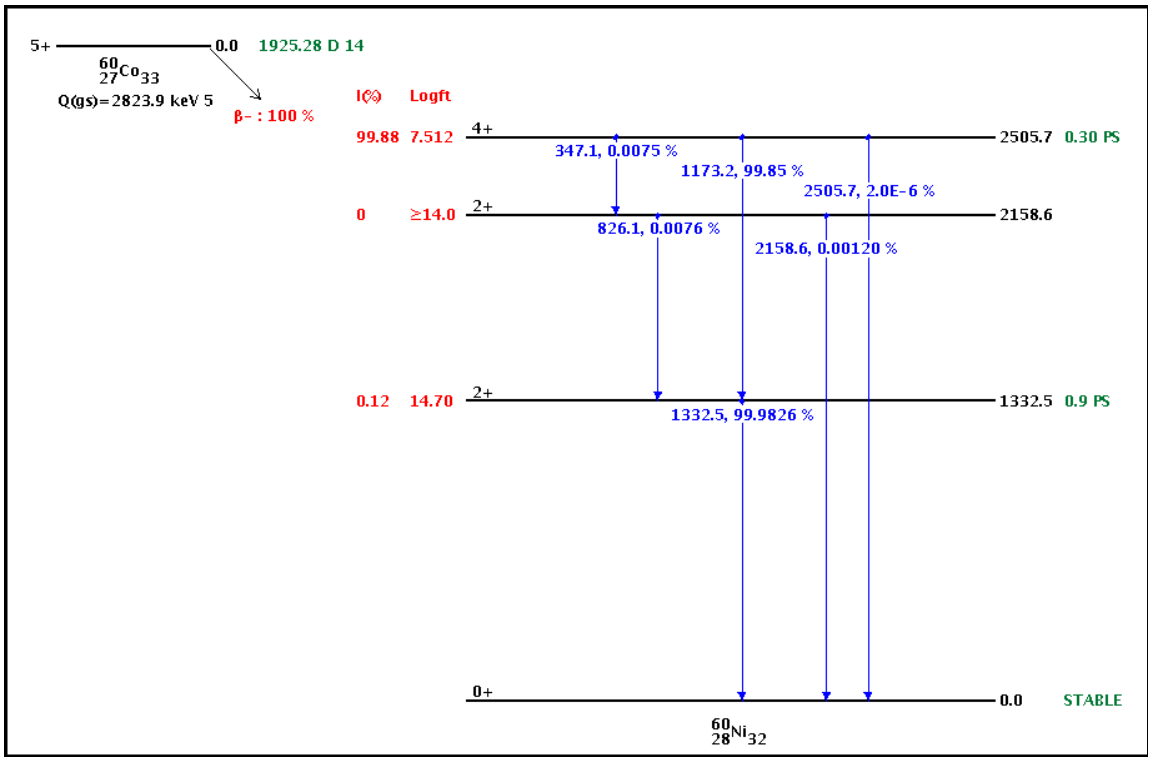


Figura 33. Esquema de decaimiento del ^{60}Co.

4. Equipamiento e instrumentación usados en activación neutrónica.

4.1. Instalaciones de irradiación.

La elección de una fuente de neutrones para análisis por activación puede ser impuesta por el rango de energía de los neutrones requeridos para que se produzca la reacción deseada y en algunos casos, a causa de la naturaleza especial del equipo del que se disponga.

A pesar de que hay varios tipos fuentes de neutrones reactores, aceleradores, y emisores de neutrones radioisotópicos, los que ofrecen una mayor sensibilidad en las aplicaciones de NAA, según la bibliografía consultada, son los reactores nucleares de investigación con un alto flujo de neutrones termales, generados a partir de la fisión de uranio.

Hay diferentes tipos de reactores, y la muestra se puede colocar en diferentes posiciones en el reactor, por lo que puede estar sometida a neutrones de distintas energías.

También se puede interponer entre la muestra y los neutrones de fisión primarios material moderador o reductor de la energía, por lo que la gama de energías de los neutrones es bastante amplia.

Sin embargo, como se muestra la Figura 34, la mayoría de las distribuciones de energía de los neutrones son bastante amplias y tienen tres componentes principales (termales, epitermales, y rápidos).

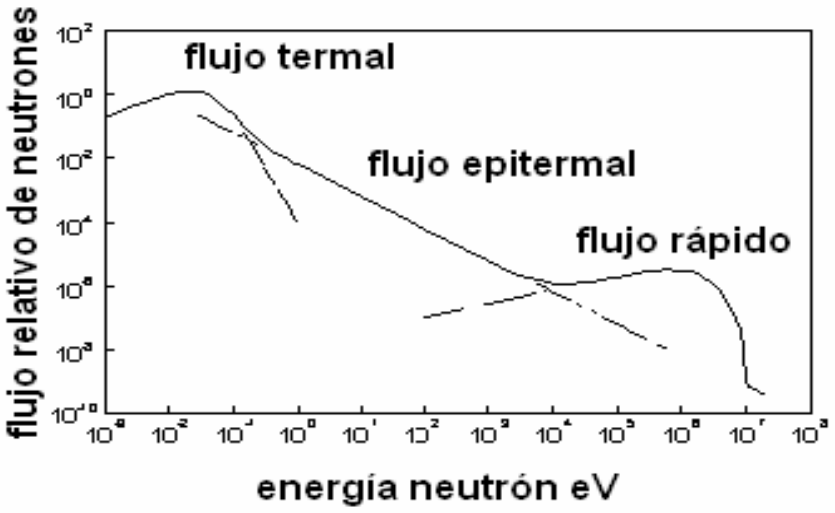


Figura 34. Espectro de energía de neutrón de un reactor típico mostrando los distintos componentes usados para describir las regiones de energía de los neutrones.

- El componente de neutrones termal consiste en un flujo de neutrones con unas energías inferiores a 0.5 eV, en equilibrio termal con los átomos del moderador del reactor. A temperatura ambiente, y el espectro de energía de los neutrones que está descrito por la distribución de Maxwell-Boltzmann, con una energía media del 0,025 electrón voltios y una velocidad probable de 2.200 m/s. En la mayoría de las posiciones de radiación del reactor, el 90-95% de los neutrones que bombardean una

muestra, son neutrones termales. En general, un reactor de 1 MW, tiene un pico de flujo de neutrones termales, de aproximadamente 10^{13} neutrones por centímetro cuadrado por segundo.

- Los neutrones epitermales, consisten en neutrones de energías entre 0,5 eV a aproximadamente 0,5 MeV, los cuales solamente han sido moderados parcialmente. Una lámina de cadmio de 1 mm de espesor, absorbe todos los neutrones termales, pero permite a los neutrones epitermales y rápidos por encima de 0,5 eV de energía, pasar a su través. En la posición típica de radiación de un reactor sin blindaje el flujo de neutrones epitermales representa aproximadamente el 2% del flujo total de neutrones. Tanto los neutrones termales como los epitermales inducen reacciones neutrón-gamma en los núcleos objetivo. Se llama análisis de activación por neutrones epitermales (ENAA) a la técnica NAA que emplea solamente neutrones epitermales para inducir a reacciones neutrón gamma por irradiación de las muestras que están siendo analizadas, dentro de blindajes de cadmio o de boro.
- El componente de neutrones rápidos del espectro de energía, que tienen energías superiores a las 0,5 MeV consisten en neutrones de fisión primarios, que aún poseen mucha de su energía original posterior a la fisión. Los neutrones rápidos contribuyen muy poco a la reacción neutrón gamma, pero en lugar de eso, inducen reacciones nucleares donde prevalece la expulsión de una o más partículas nucleares, neutrón-protón, neutrón-neutrón, y neutrón-2 neutrones. En la posición de radiación típica del reactor, aproximadamente el 5% del flujo total consiste en neutrones rápidos. La técnica NAA que emplea reacciones nucleares inducidas por neutrones rápidos, se llama análisis de activación por neutrones rápidos (FNAA).

En general, en las aplicaciones más conocidas, aunque no en nuestro caso, la mayoría de los productos de activación útiles son el resultado de interacciones con neutrones termales y la forma de obtener un flujo de neutrones más alto es utilizando un reactor nuclear termal. Las fuentes de neutrones diferentes al reactor nuclear se usan solamente en una pequeña proporción en el análisis por activación neutrónica. Sin embargo, estas fuentes se usan a menudo en aplicaciones comerciales, y su contribución al análisis por activación neutrónica puede ser mayor en términos de número de muestras analizadas.

Las fuentes de neutrones habituales son:

[1] Reactor de investigación: En el reactor se produce un flujo elevado de neutrones termales, del orden de 10^{14} a 10^{18} n m^{-2} s^{-1}, pero tiene una proporción importante de neutrones epitermales y rápidos.

i. Los neutrones rápidos se pueden utilizar para provocar la activación de algunos elementos,

ii. se hacen irradiaciones con neutrones epitermales interponiendo filtros de cadmio o boro en el reactor.

[2] La segunda fuente más común de irradiación es un generador de neutrones, que produce neutrones monoenergéticos de 14 MeV. El generador tiene una ventaja sobre reactor, y es que es portátil y de fácil operación.

[3] Finalmente hay otra tercera fuente de neutrones: las fuentes isotópicas de las que son un ejemplo, el Californio 252 o fuentes del tipo alfa-neutrón.

Generalmente, los emplazamientos para irradiación con una fuente de neutrones tienen un amplio rango de geometrías que determina la forma y el tamaño del contenedor de la muestra. La variación en el flujo de neutrones es también un factor significativo que deberá evaluarse y corregirse si es necesario.

A continuación se analizan las características de cada uno de estas fuentes de neutrones.

4.1.1. Reactores nucleares de investigación.

4.1.1.1. Tipos de reactores de investigación.

Hay muchos diseños de reactores pero los principios en los cuales están basados son muy similares. El material fisionable experimentará fisión con neutrones, acompañado por la producción de neutrones. La mayoría de los reactores usados para el análisis de activación con neutrones están basados en la fisión del uranio 235, donde el núcleo del reactor se hace de elementos combustibles de uranio enriquecido.

El uranio 235 experimentará fisión solamente con neutrones termales y así el corazón del reactor está rodeado con un moderador para ralentizar a los neutrones.

El moderador es, normalmente, de agua ligera, agua pesada, grafito o berilio. Durante el proceso se genera una gran cantidad de calor, y se requiere también un refrigerante que puede ser gas, agua o metal líquido.

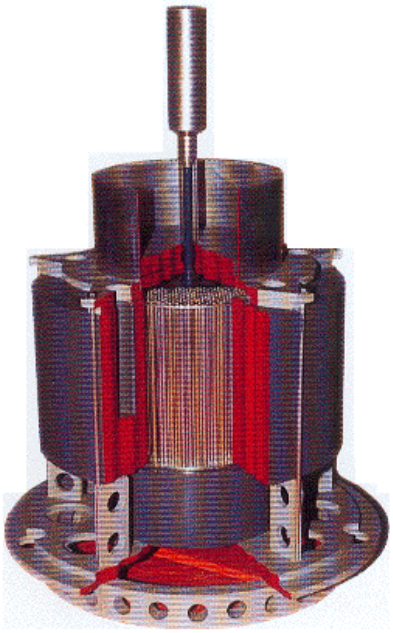
En un reactor de piscina, por ejemplo, se puede usar agua ligera tanto como moderador como refrigerante. Las varillas de control, hechas con material absorbente de neutrones tales como cadmio o boro, se usan para controlar la tasa de producción de neutrones. Por la eliminación gradual de las varillas de control desde el núcleo se permite al reactor alcanzar su potencia de operación.

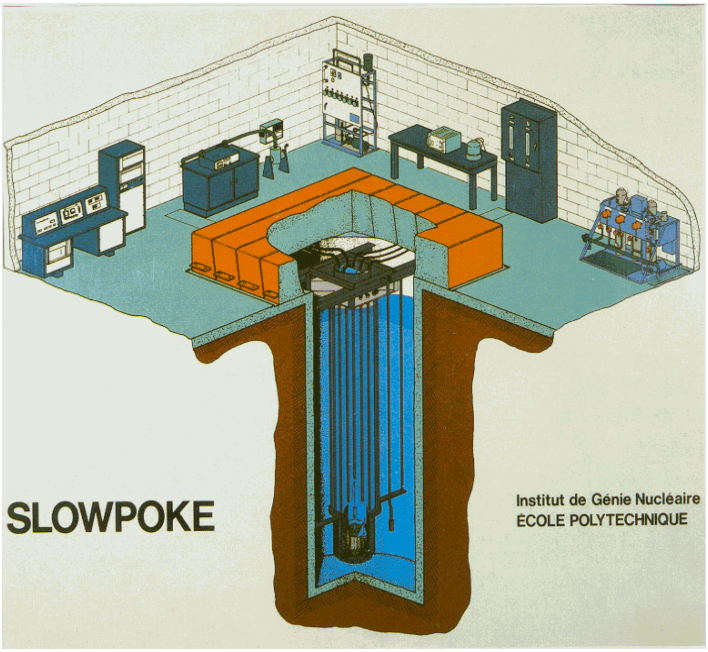
El reactor se mantiene a una energía de operación constante por ajuste de una varilla de control final y se apaga al mover las varillas de control dentro del núcleo.

Los reactores típicos usados en la activación por neutrones incluyen el reactor canadiense Slowpoke, el norteamericano TRIGA, y otros reactores tipo piscina.

a. SLOWPOKE: Se diseña específicamente como una herramienta de enseñanza, en el análisis de la activación y en la producción de pequeñas cantidades de radio isótopos. El combustible está en 19,9% enriquecido en Uranio y consiste en 200 elementos de combustible en un núcleo compacto que mide 220 mm de diámetro por 227 mm de altura. El sistema se diseña para operar con control remoto.

El reactor tiene 5 posiciones de irradiación con un flujo máximo de 10^{16} n m^{-2} s^{-1} y 5 tubos exteriores reflector con un flujo máximo de 0,5 *10^{16} n m^{-2} s^{-1}.




SLOWPOKE
Institut de Génie Nucléaire
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

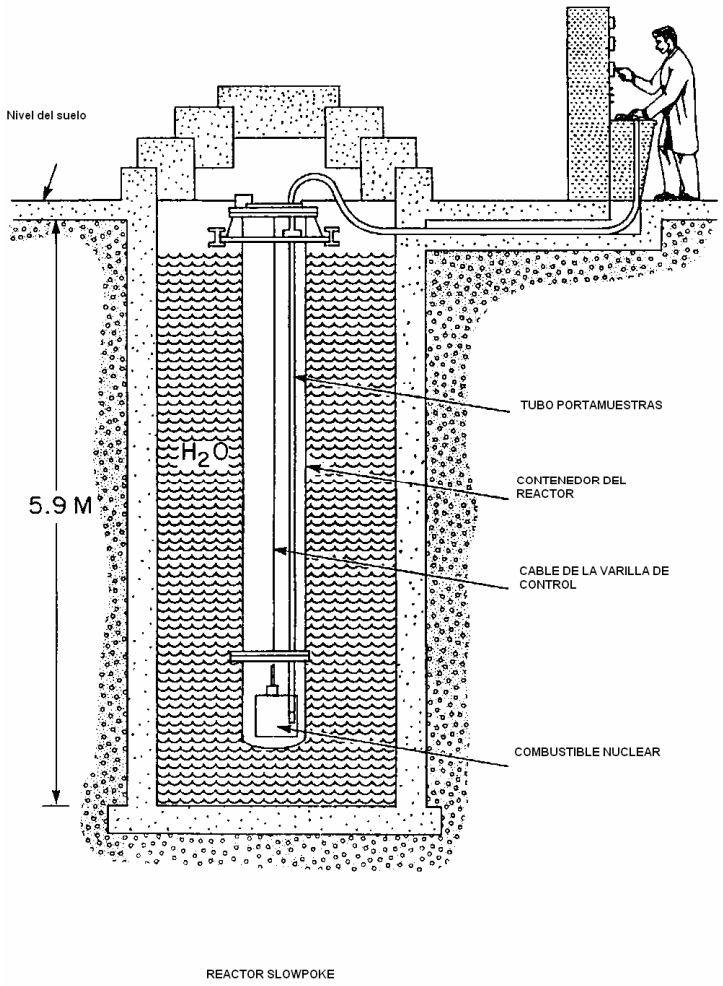
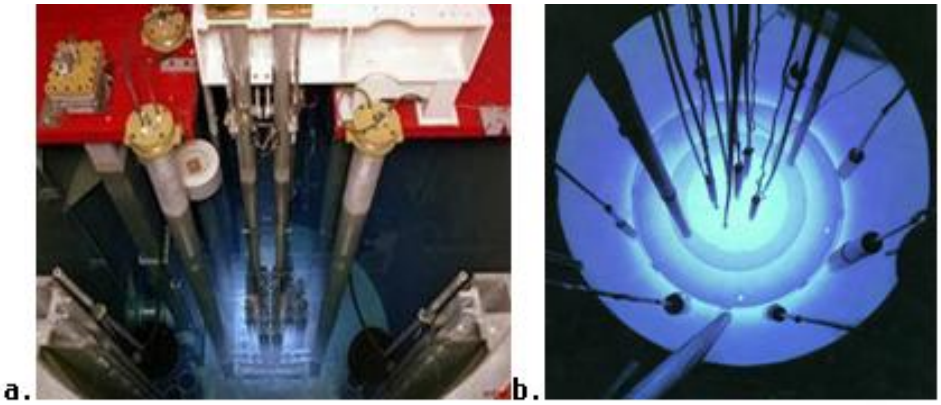


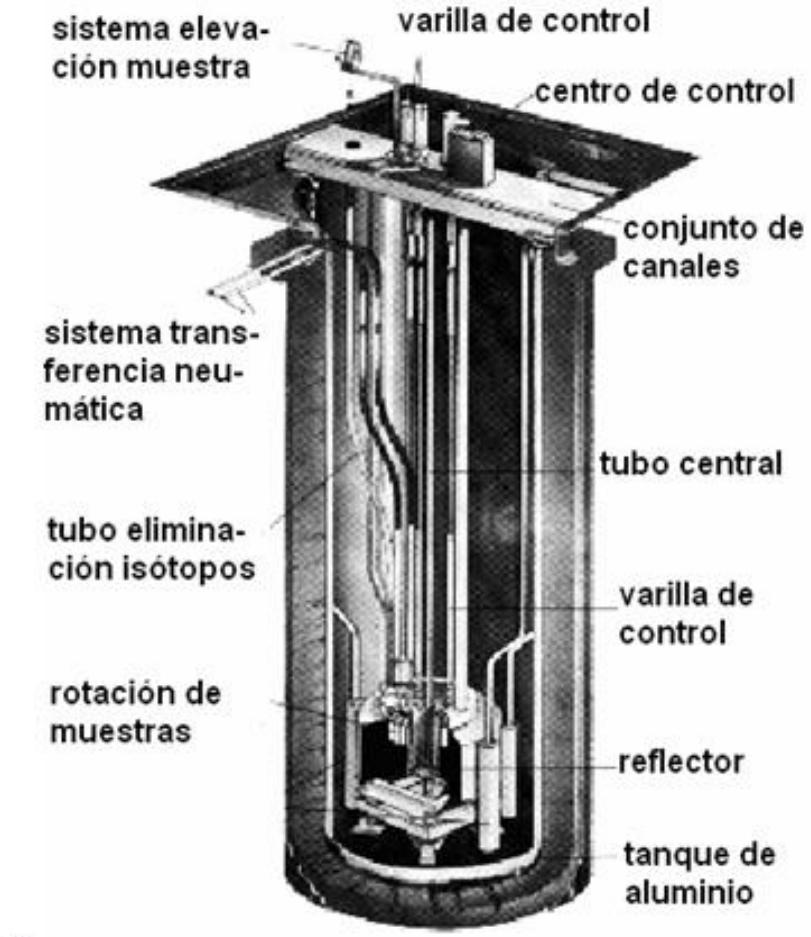
Figura 35. Imágenes del reactor canadiense Slowpoke.

b. El reactor TRIGA se diseña como un reactor de propósito general pero ha incorporado en su diseño la posibilidad para establecer unos sistemas de igualación del flujo que lo hacen muy adecuado para el análisis por activación.



a. b.

Reactor Triga Mark I - 250 Kw.



c.

Figura 36. Núcleo del reactor Triga.

c. La mayoría de los neutrones en un reactor tipo piscina están termalizados y en estas energías el proceso de activación, es el proceso más probable que ocurra, por interacción de un neutrón y la absorción por el núcleo. La mayoría de los elementos traza de interés se pueden detectar por la activación de un núcleo estable con neutrones termales.

Aunque la mayoría de los neutrones en el núcleo del reactor están ralentizados a energías por debajo de la energía del corte del cadmio de 0,5 eV, hay todavía un componente con energías más altas, en la región epitermal y rápida.

La activación a energías de neutrón por encima del corte del cadmio ocurre en forma de resonancias, donde solamente se pueden absorber neutrones con una energía específica para activar el núcleo objetivo.

Es posible moderar los neutrones desde el reactor colocando el núcleo objetivo en un lugar rodeado por un moderador tal como grafito. Similarmente se pueden eliminar los neutrones termales del flujo de neutrones usando una fuente absorbente de neutrones termales tales como el cadmio o el boro. De esta manera se consigue una proporción determinada de neutrones epitermales y rápidos.

Muchos reactores son únicos en su diseño. La potencia máxima de salida de los reactores nucleares varía desde kilovatios a megavatios. Correspondientemente el flujo de neutrones obtenible varía por encima de un máximo de alrededor de 10^{18} n m^{-2} s^{-1}.

Sin embargo, el flujo de neutrones en un emplazamiento de irradiación particular dependerá de su distancia al núcleo del reactor. Cuanto más alto sea el flujo de neutrones en la activación por neutrones mejor será la activación de la muestra pero la activación de las interferencias de fondo aumentará igualmente así que esto significa que la mejora en la detección del elemento de interés no es directa.

La principal consideración cuando elegimos el reactor a usar para activación es que los lugares que vayan a ocupar las muestras sean adaptables y accesibles. En la práctica no hay a menudo muchas posibilidades de escoger las posiciones de irradiación disponibles y el usuario tiene que adaptarse a las limitaciones de la instalación.

4.1.1.2. Manipulación de la muestra en el reactor.

El introducir una muestra en una fuente de neutrones requiere cuidado. Es frecuente el caso de laboratorios de análisis por activación neutrónica, que han iniciado su actividad después de que el reactor haya sido instalado y haya estado operando durante un tiempo.

Las instalaciones de irradiación se desarrollan o modifican para satisfacer las necesidades de análisis de activación y como resultado, las instalaciones varían incluso entre reactores con el mismo diseño original. La forma de introducir una muestra objetivo en un flujo de neutrones dependerá de la estructura física del reactor. Se requiere que la introducción de una muestra en la vasija del reactor no afecte a la operación del reactor, por lo que, el objetivo es normalmente, conseguir colocar la muestra cerca del núcleo del reactor, sin afectar su operación.

La posición de la irradiación puede estar en el núcleo o cerca de la parte exterior de la configuración del núcleo. En un reactor tipo piscina, los tubos de irradiación están en agua; si el moderador es grafito, entonces los tubos de irradiación estarán colocados en el bloque de grafito. Si se puede acceder al reactor desde la parte superior, entonces

pueden instalarse tubos verticales para dejar descender las muestras, de forma que en su posición final estén cerca del núcleo o dentro de él.

Alternativamente, pueden instalarse tubos horizontales, que terminen cerca del núcleo. Se usan tubo cerrados para alojar muestras que no estén en contacto con el agua y que rodea al núcleo. Estos tubos se hacen de aluminio a causa de su resistencia a la corrosión y el hecho de que los productos de activación tengan vida corta, si han de ser removidos desde el reactor hay una radiación residual pequeña. El aluminio tiene un efecto pequeño en el flujo de neutrones.

Ya que el objetivo es posicionar la muestra cerca del núcleo, la localización final debe conseguirse por control remoto. Las muestras deben cargarse manualmente en el lugar de irradiación, para después, descenderlas por tubos verticales hasta que estén en línea con el núcleo del reactor.

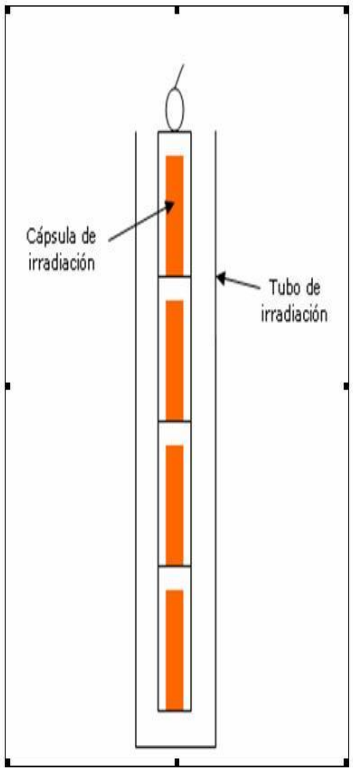


Figura 37. Dispositivo portamuestras para irradiar muestras en un reactor.

La Figura 37 muestra un dispositivo típico usado para introducir las muestras en el reactor. En la figura 36.c. se observan los dispositivos colgados en el núcleo del reactor.

Para apilar las muestras unas sobre otras a lo largo de toda la longitud, se usan escaleras con las que se descienden usando por ejemplo una cuerda de nylon al fondo del tubo de irradiación. Alternativamente, si se usa un tubo de irradiación horizontal, las muestras se colocan en su posición usando una varilla.

Si el tiempo de irradiación es corto, de unos pocos minutos o menos, es importante tener un tiempo constante para cargar y descargar las muestras. Con la carga manual de las muestras a veces no

se puede garantizar el mantenimiento constante del tiempo de carga y descarga, por lo que se hacen necesarios los sistemas mecánicos.

Los sistemas de carga mecánicos incluyen sistemas de bandejas movidas por cadenas y las cuales transportan las muestras hasta su destino final, en un camino relativamente corto, pero reproducible.

Si el sistema de carga es lento, la muestra tendrá que viajar a través de la región del reactor sometiéndose a un flujo alto de neutrones hasta alcanzar su destino y cuando se descargue la muestra tendrá que regresar a través de una zona que tendrá un flujo de neutrones variable desde un valor alto hasta un valor bajo.

En consecuencia, se ve que la muestra está sometida a un flujo de neutrones total que es difícil de cuantificar, pero que será el mismo cada vez que se irradie la muestra.

En el caso de irradiaciones muy cortas, es importante que la muestra se cargue y descargue rápidamente, por lo que es más conveniente usar un equipo neumático de desplazamiento de la muestra.

En un reactor, es deseable que el número de partes móviles sea mínimo y el usar un sistema neumático para mover la muestra tiene diversas ventajas: la muestra se puede lanzar a través del tubo de irradiación con aire presurizado o gas nitrógeno. De esta manera es bastante sencillo irradiar las muestras usando tiempos de tránsito de segundos o menos.

Un sistema de irradiación neumática consta de 3 pasos:

- La muestra se carga en el tubo y se impulsa al sitio de irradiación,
- se deja durante el tiempo de irradiación requerido y
- se impulsa hacia fuera de nuevo.

La muestra se impulsa hacia dentro al aplicarle gas comprimido en el extremo del tubo de irradiación. Para desplazar la muestra hacia afuera, se aplica gas al otro extremo del tubo de irradiación a través de una ranura separada o usando un tubo concéntrico, que impulsa el gas hacia abajo del tubo exterior para impulsar la muestra hacia fuera.

El flujo de gas comprimido se controla usando una válvula de solenoide que opera al aplicarle energía durante el tiempo requerido para el tránsito, generalmente uno o 2 segundos. La operación de las válvulas de solenoide se puede controlar manualmente.

Se puede automatizar muy fácilmente un equipo neumático y el proceso se puede implementar en etapas.

- En una primera etapa de la automatización, se podría controlar la muestra durante un tiempo de irradiación con un reloj, el cual se inicializa una vez que la válvula de entrada ha enviado la muestra al interior de lugar de irradiación.
- Una vez se ha alcanzado el tiempo de irradiación preseleccionado, la válvula de expulsión se dispara y envía la muestra fuera del reactor. Esto permite que una muestra sea irradiada de una manera muy reproducible.

- El siguiente paso es irradiar un número de muestras en secuencia mediante la introducción de un cargador de muestras en el reactor.
- Finalmente se puede introducir un tiempo de espera entre irradiaciones, si se requiriere. El control automático de las válvulas de solenoide y los intervalos de tiempo pueden estar basados en el uso de microprocesadores.

Los controladores lógicos programables, que han sido desarrollados para aplicaciones de control de procesos, como medio de reemplazar los circuitos lógicos, son controladores muy adecuados para este fin. Constan de módulos entrada y salida, un procesador central, y un terminal de programación, que proporcionan un sistema barato y muy flexible para controlar los sistemas de irradiación automáticos.

Si la muestra tiene que ser analizada un periodo cercano del periodo de irradiación, como es el caso de radio nucleídos de vida corta y neutrones diferidos, la muestra se puede transferir automáticamente y a la estación de contaje de nuevo usando el sistema neumático. Una señal desde un sistema automático disparará el equipo de contaje cuando la muestra se encuentre en la posición de contaje.

La Figura 38 es un diagrama esquemático de un sistema neumático de análisis de rayos gamma, donde existe la opción de enviar la muestra de nuevo al reactor después del contaje, para una nueva irradiación, lo que también se llama activación cíclica.

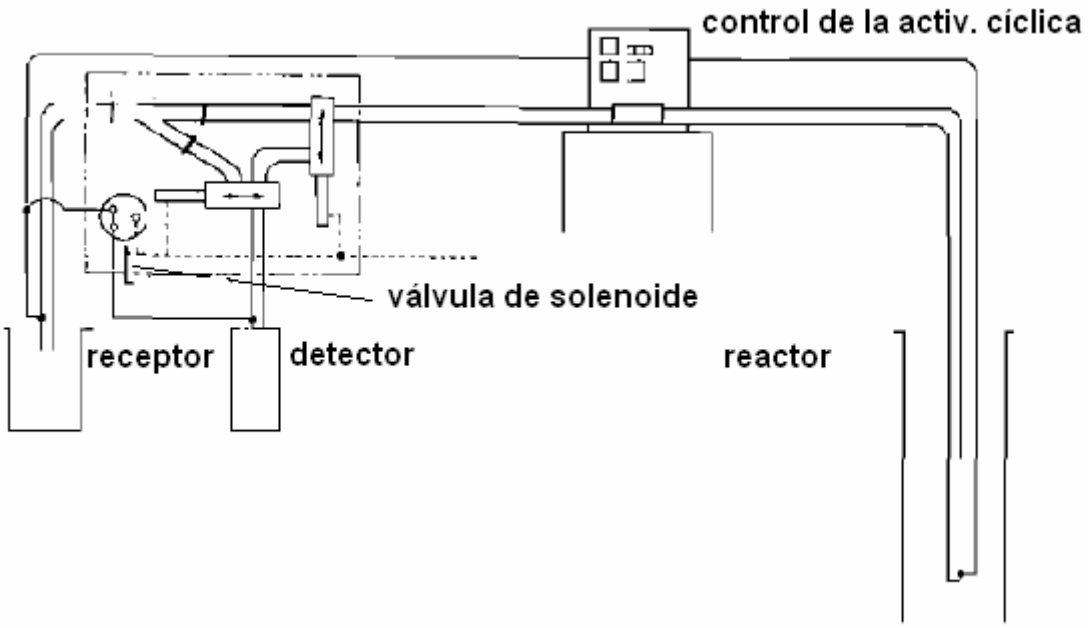


Figura 38. Diagrama esquemático de una activación cíclica.

4.1.1.3. Activación en un reactor.

En un reactor nuclear termal, es de esperar que la mayor proporción de neutrones sean termales, pero hay una pequeña componente de neutrones epitermales y rápidos.

Esto no supone un problema a no ser que se requiera un flujo de neutrones libre de mayor energía. Se puede crear una posición de irradiación de neutrones termalizados en un reactor en una posición externa al núcleo del reactor y rodeado con un buen moderador tal como grafito. A causa de esta localización, fuera del flujo elevado que se encuentra cercano al núcleo de la columna termal, tendrá un flujo de neutrones termales más bajo que el resto de los lugares de irradiación.

En algunos casos, puede haber un requerimiento para activación con neutrones epitermales, quizás para reducir una reacción de interferencia inducida por neutrones termales. Los neutrones termales se filtran usando un absorbente de neutrones termales, usualmente hecho de cadmio y boro; y ambos son muy buenos absorbentes de neutrones termales. Una lámina de cadmio de 1 mm de espesor, es opaca a los neutrones termales, y la muestra interior a un filtro de cadmio de 1 mm de espesor, ve solamente los neutrones por encima de 0,5 eV. El boro corta neutrones con una energía más alta, en un punto que depende del espesor de boro o componente de boro.

Es posible instalar tubos de irradiación con capas de cadmio en un reactor, para facilitar esta irradiación con neutrones epitermales. El tubo de irradiación epitermal se hace al colocar hojas de cadmio de 1 mm alrededor de un tubo de irradiación de aluminio, y colocar otra capa de aluminio exterior para cubrir el tubo, de tal manera que el cadmio no esté en contacto con el moderador.

El boro y sus componentes son más difíciles de mecanizar y así, no son tan aptos para instalar en la vasija del reactor.

En reactores de alta potencia puede haber un problema de quemado en un tubo de cadmio y puede no ser práctico instalar un tubo de activación epitermal en el reactor.

Además, si está limitado el espacio, puede ser inviable tener una posición de irradiación dedicada a la activación con neutrones epitermales. Es posible construir una cápsula de irradiación con paredes de boro o cadmio, para cargar en su interior las muestras.

Los recipientes de irradiación de cadmio se pueden usar también incluso con combinaciones de boro. Cuando se irradian, el cadmio produce niveles significativos de actividad, los cuales pueden dar problemas si los recipientes se abren inmediatamente después de la irradiación y, en estos casos, se prefieran los compuestos de boro. Ya que los productos de activación tienen radiactividad despreciable, se usa carburos de boro y nitruros de boro para fabricar contenedores de irradiación.

Sin duda, para la medida de radio nucleídos de vida muy corta, los cuales deben contarse inmediatamente, es preferible eliminar toda la irradiación que se pueda y usar una posición de irradiación de neutrones epitermales con el absorbente en el tubo instalado en el reactor.

4.1.1.4. Distribución del flujo de neutrones.

La distribución del flujo de neutrones en una fuente de neutrones no es constante. Por el contrario, en el reactor, el flujo de neutrones es poco probable que permanezca constante, incluso en distancias relativamente cortas. El flujo de neutrones decae con la distancia tanto en la dirección vertical como horizontal desde el centro del núcleo del reactor. El efecto es una curva del tipo coseno, con un máximo en la línea central del núcleo. Los análisis de activación neutrónica están basados en el principio de que la actividad inducida es proporcional al flujo de neutrones, y, por eso, cualquier medida cuantitativa se basa en que el flujo de neutrones es reproducible y cuantificable.

El mejor camino para hacer esto es mantener el flujo tan constante y reproducible como sea posible. En un reactor TRIGA, esto se consigue usando un equipo de irradiación rotativo, en el que las muestras viajan lentamente alrededor del perímetro del núcleo, de tal manera que todas las muestras ven la misma integral de flujo integrado durante la irradiación. La principal desventaja de los sistemas de igualación del flujo es que por su naturaleza, las muestras verán todas un flujo medio, obtenido al viajar a través de regiones con alta y baja densidad de neutrones. La naturaleza compacta de algunas vasijas del reactor, implican que queda poco espacio disponible para los sistemas de igualación, si tiene que alcanzarse el máximo flujo de neutrones.

Si no es posible utilizar un sistema de igualación del flujo, es necesario aceptar que existen las variaciones, y, por tanto, hay que medirlas cuidadosamente, y si es necesario corregirlas. La distribución del flujo de neutrones en una posición de irradiación, puede caracterizarse usando un monitor de flujo de neutrones, bien en el momento del experimento, o en una medida separada.

Normalmente, el flujo de neutrones en una posición de irradiación, se monitoriza usando un combustible activado. Se debe tener cuidado en la selección del material usado, ya que un elemento activado solamente por neutrones termales, simplemente dará una medida aproximada del flujo de neutrones termales en la posición de irradiación.

En algunos casos, el elemento que se va a medir puede ser activado por neutrones epitermales, y así, el componente de neutrones epitermales debe medirse por otros medios. Se necesitan 2 monitores: uno absorbente de neutrones termales, tal como el cobalto, el cobre o el hierro, y otro principalmente absorbente de neutrones epitermales, tal como el boro. Un monitor de combinación de cobalto y boro, por ejemplo, proporcionaría toda la información necesaria.

El problema de la variación del flujo debida a la distancia, se minimiza si todo las muestras se activan y la misma posición de irradiación, y en la misma posición dentro de la cápsula de irradiación, sin muestras apiladas. Esto solamente es posible si las muestras se irradian individualmente, lo cual es el caso frecuente cuando se hacen irradiaciones cortas con aparatos de irradiación neumáticos y con otras fuentes de neutrones tales como aceleradores y generadores de neutrones.

En este caso, las muestras se irradian en secuencia, una tras otra, y así es una cuestión importante la variación del flujo de neutrones con el tiempo. Los operadores de los reactores de investigación, usualmente mantienen una potencia constante. Sin embargo, si el uso del reactor

implica cambios en la configuración del núcleo, de flujo de neutrones en una posición de irradiación de un día a otro. Incluso un pequeño cambio tal como la introducción de un recipiente con cadmio en una posición de irradiación, o algún otro fuerte absorbente de neutrones, reducirá el flujo de neutrones termales en las proximidades.

4.1.2. Generadores de neutrones.

Se usan para producir neutrones más energéticos, y a menudo se ven como un complemento a los reactores nucleares, los cuales tienen predominantemente flujos de neutrones termales. Los generadores de neutrones disponibles comercialmente de deuterio tritio, están basados en la reacción de un rayo de deuterio en el tritio $^{3}H(d,n)^{4}H$, y se usa generalmente para análisis por activación de neutrones rápidos. Los iones hidrógeno se aceleran a 150 kV y las corrientes de iones de deuterio son del orden de 1-5 mA. La energía de los neutrones resultantes es aproximadamente 14 MeV, y las intensidades de la fuente de neutrones son de la orden de 10^{11} n s^{-1}.

El generador de neutrones rápidos se usa específicamente en la determinación de carbón, azufre y sílice, y tiene la ventaja de que puede ser instalado en un emplazamiento industrial. Por ejemplo, en una compañía petrolífera se usa, para analizar el oxígeno en productos de petróleo, un sistema totalmente automatizado con un generador de neutrones rápidos, que procesa a alrededor de 1600 muestras al año.

El generador Van de Graaf y el ciclotrón, se basan en la acción de un rayo de deuterio en un objetivo de berilio, por ejemplo, $^{9}Be(d,n)^{10}Be$. Aunque no ha sido aplicado ampliamente la técnica de análisis por activación neutrónica con el uso de ciclotrón, se han examinado los límites de detección para muchos elementos en un trabajo reciente, en el que el rayo de deuterio se aceleró por encima de 14,5 MeV y la intensidad del rayo fue 20 μA.

Los neutrones monoenergéticos rápidos se pueden producir en reacciones nucleares inducidas por proyectiles generados a partir de un acelerador. La reacción deuterio tritio es una de las más ampliamente utilizadas para este propósito.

El deuterio se acelera en un generador electrostático hasta energías por encima de la del umbral de la reacción $T(d,n)^{4}He$, produciendo neutrones con energías de alrededor de 14 MeV. La interacción D-T puede continuar a través de varios canales diferentes, y el campo de los diferentes canales depende de la energía cinética del deuterio incidente acelerado y del ángulo en el cual se emiten los neutrones.

La tabla siguiente resume los valores de Q, la energía umbral y la energía de los neutrones para la reacción deuterio tritio con un ángulo de emisión de los neutrones de 0° en el sistema de laboratorio.

Exit channel	$n + {}^4He$	$n + p + t$	$2n + {}^3He$	$n + d + d$	$2n + p + d$	$3n + 2p$
E_{in}	$E_n(0^\circ_{lab})$	$E_{n\,max1}$	$E_{n\,max2}$	$E_{n\,max3}$	$E_{n\,max4}$	$E_{n\,max5}$
0.000	14.028					
3.711	20.461	0.298				
4.985	21.964	2.000	0.400			
10.443	27.891	7.356	6.416	0.838		
14.159	31.717	10.006	5.763	1.136		
17.876	35.465	14.472	13.573	9.521	6.414	1.435
Q-values	17.589	−2.225	−2.988	−6.257	−8.482	−10.707

Tabla 36. Valores Q, energía umbral y del neutrón a Tª=0º, para la reacción D-T-

La interacción D-T a bajas energías del deuterio incidente principalmente sigue a través del canal T (d, n) ^{4}He. Esta reacción tiene una resonancia con una sección eficaz grande a 107 keV. El valor Q de la reacción (+ 17,59 MeV) es muy alto, y por eso, pueden producirse los neutrones de 14 MeV con aceleradores de baja energía.

La energía de los neutrones depende del ángulo relativo de emisión respecto a la dirección del rayo; es máximo a 0° y disminuye con el aumento del ángulo de emisión. Esta característica se usa en los experimentos; los objetivos pueden irradiarse con neutrones de diferentes energías, dependiendo de la posición de las muestras irradiadas respecto al objetivo productor de neutrones.

La intensidad de los rayos de neutrones también depende del ángulo de emisión. Estas dependencias se muestran en las figuras siguientes.

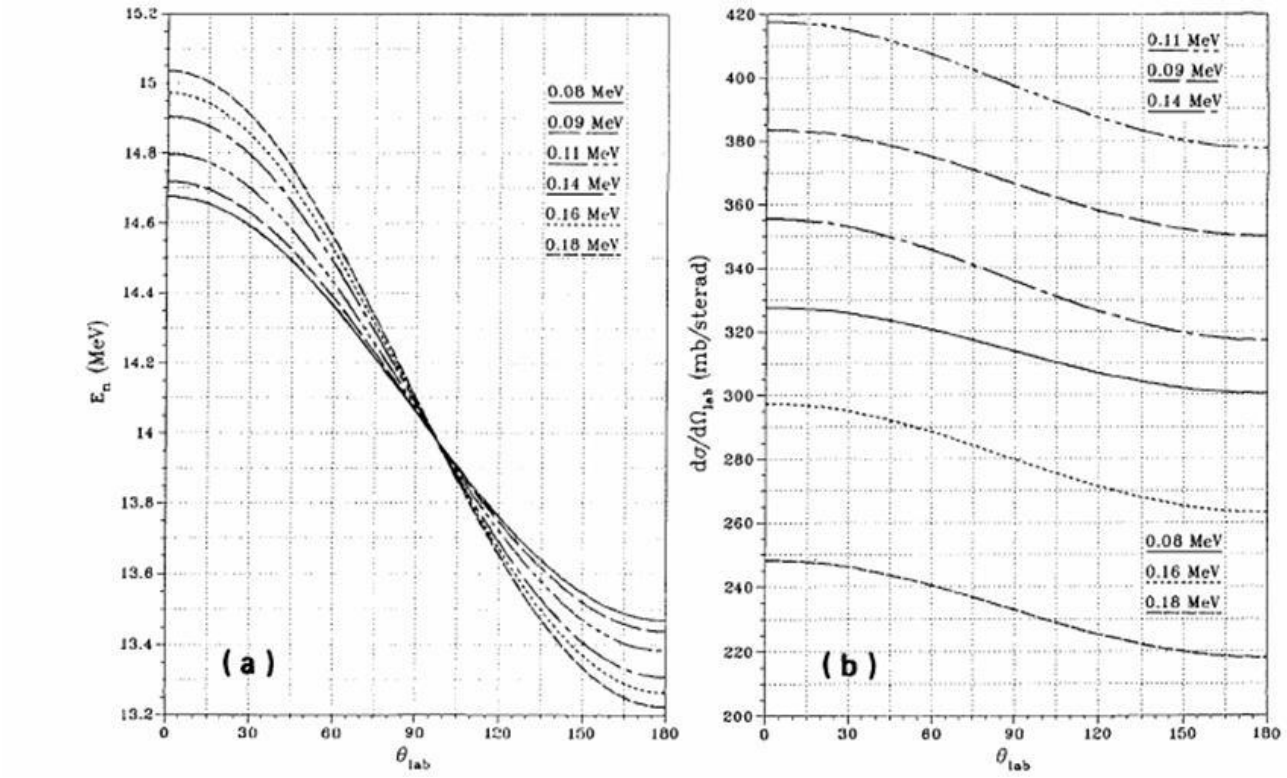


Figura 39. Dependencia angular la energía del neutrón y variación de la sección eficaz de la reacción D-T para diferentes energías de los deuterios incidentes.

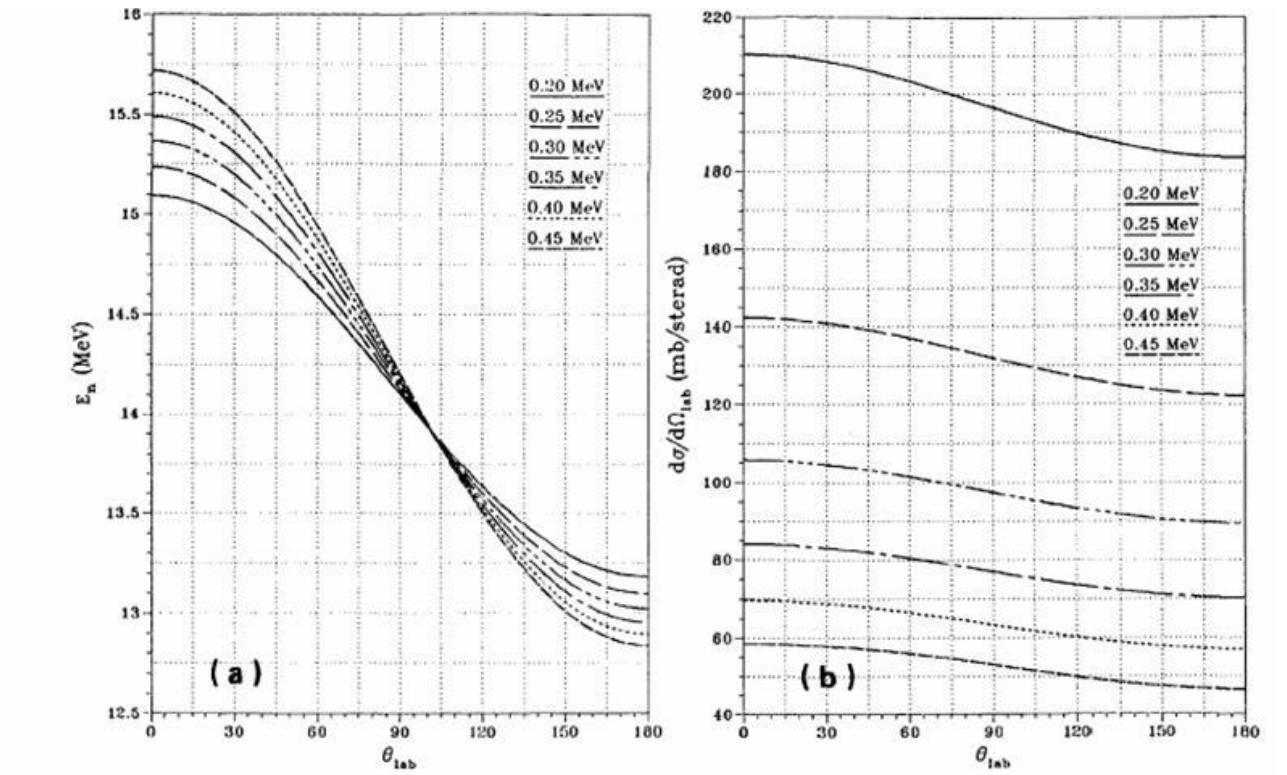


Figura 40. Dependencia angular la energía del neutrón y variación de la sección eficaz de la reacción D-T para diferentes energías de los deuterios incidentes.

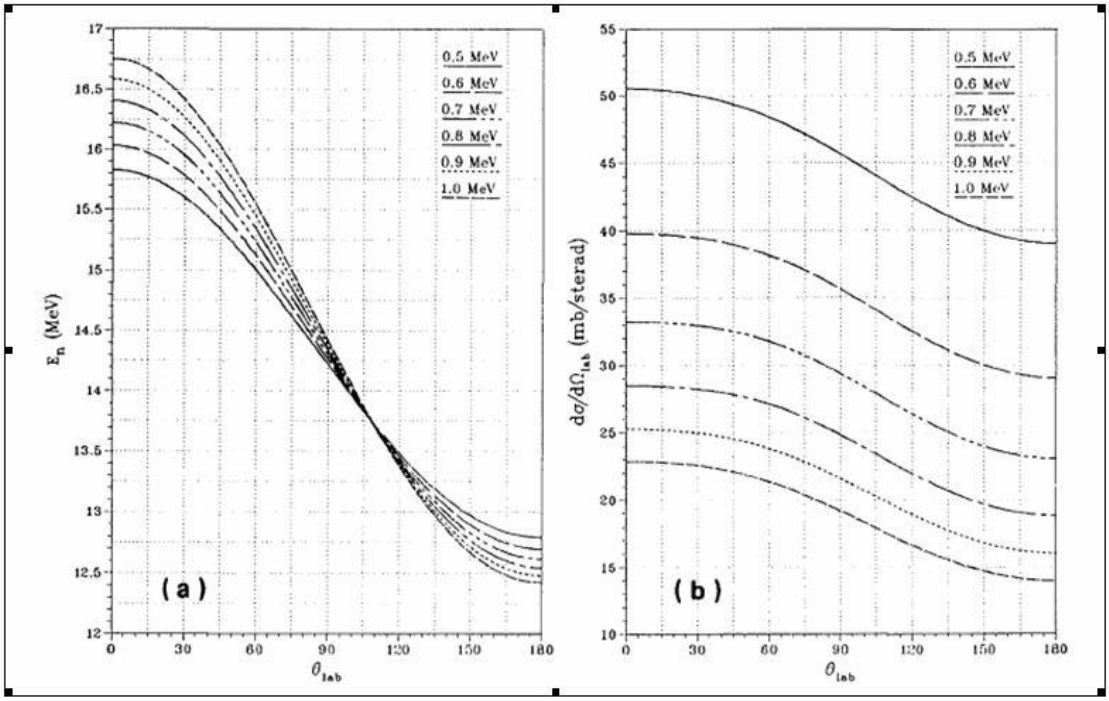


Figura 41. Dependencia angular la energía del neutrón y variación de la sección eficaz de la reacción D-T para diferentes energías de los deuterios incidentes.

4.1.3. Fuentes isotópicas.

Hay básicamente 3 tipos de fuentes isotópicas que se usan en el análisis de activación:

- fuentes gamma,
- neutrón del tipo foto neutrón,
- fuentes alfa (alfa, neutrón), y
- fuentes de fisión espontánea.

[1] La fuente fotón neutrón, se basa en el hecho de que el ^{9}Be en particular, emite neutrones cuando es bombardeada con rayos gamma. El ^{2}D es también una fuente fotón neutrón útil. Se escoge el ^{9}Be, a causa de que el umbral para la reacción es de 1,67 MeV, mientras que para el ^{2}D es de 2,33 MeV, y los demás nucleidos tienen un umbral de aproximadamente 6 MeV.

En consecuencia, usando ^{9}Be, la reacción ocurrirá con una fuente de rayos gamma tal como el ^{124}Sb, el cual emite un rayo gama de 1,7 MeV.

La fuente se produce asimismo al rodear un emisor gamma con una delgada capa de berilio. Las energías de los neutrones emitidos por estas fuentes fotonucleares, son del orden de 0,2 a 0,8 MeV, dependiendo del objetivo, y, naturalmente, se puede moderar con una capa de cera parafinada o polietileno.

[2] Las fuentes alfa consisten en una mezcla de berilio y un emisor alfa como el polonio, el americio, el radio, etc. y se activan con las partículas alfa en la reacción:

$$^{9}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + {}^{1}n + 5{,}7\ MeV$$

Otros objetivos pueden ser el boro, el flúor y el ^{13}C, pero el berilio da el mayor número de neutrones por partículas alfa, y la energía puede ser mayor, del orden de 6,7 a 11 MeV, dependiendo del ángulo de dispersión.

[3] La fuente isotópica basada en la fisión espontánea del ^{252}Cf, se ha aplicado ampliamente. Tiene una vida media de 2,6 años, así que tiene una vida de trabajo útil pequeña. La energía media de los neutrones es de 2,348 MeV. Un ejemplo de su uso comercial es un sistema usado para el análisis rutinario de muestras de petróleo crudo para la determinación de vanadio.

La fuente de ^{252}Cf, consta de una fuente de 6 GBq (2,9 mg), recubierta por acero inoxidable en un tanque de agua grande, con un flujo máximo de neutrones termales estimado en 10^{12} n m^{-2} s^{-1}. Es capaz de procesar alrededor de 10.000 muestras al año. La fuente de californio es útil para usar en el campo, por ejemplo se usa en un analizador on line para determinación de hierro y aluminio en muestras de mineral de hierro.

El uso de las fuentes isotópicas de neutrones viene condicionado por el umbral de las energías de las reacciones requeridas, por el blindaje de la radiación, y por cuestiones de seguridad. Los espectros de energía de estas fuentes se muestran en las siguientes figuras:

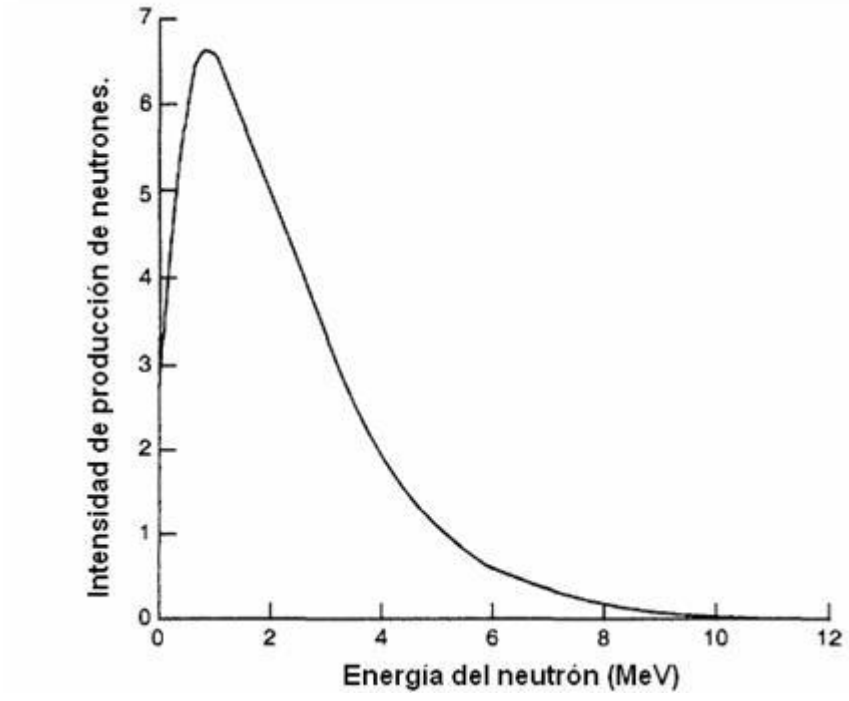


Figura 42. Espectro de energía de la fuente de ^{252}Cf.

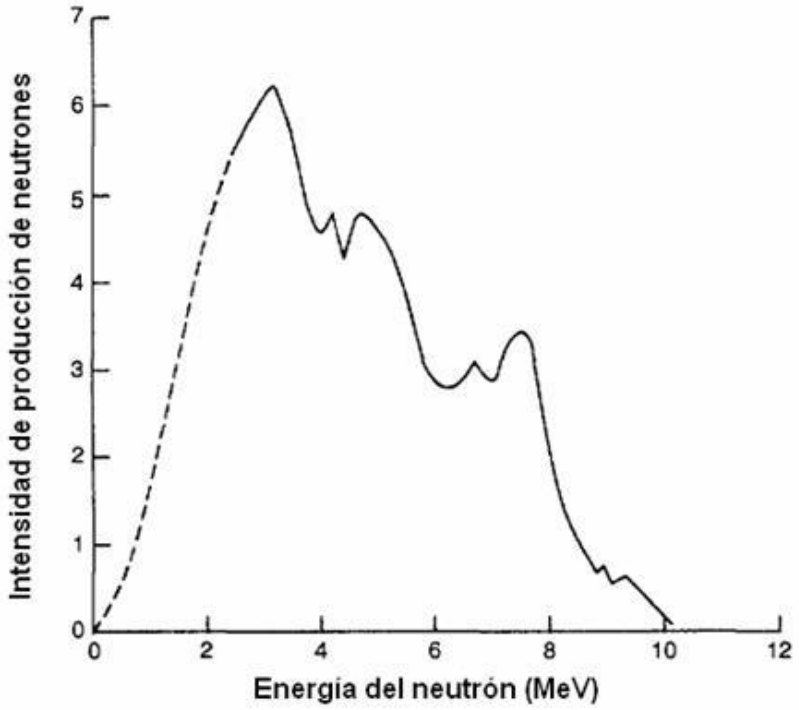


Figura 43. Espectro de energía de una fuente de ^{241}Am-Be

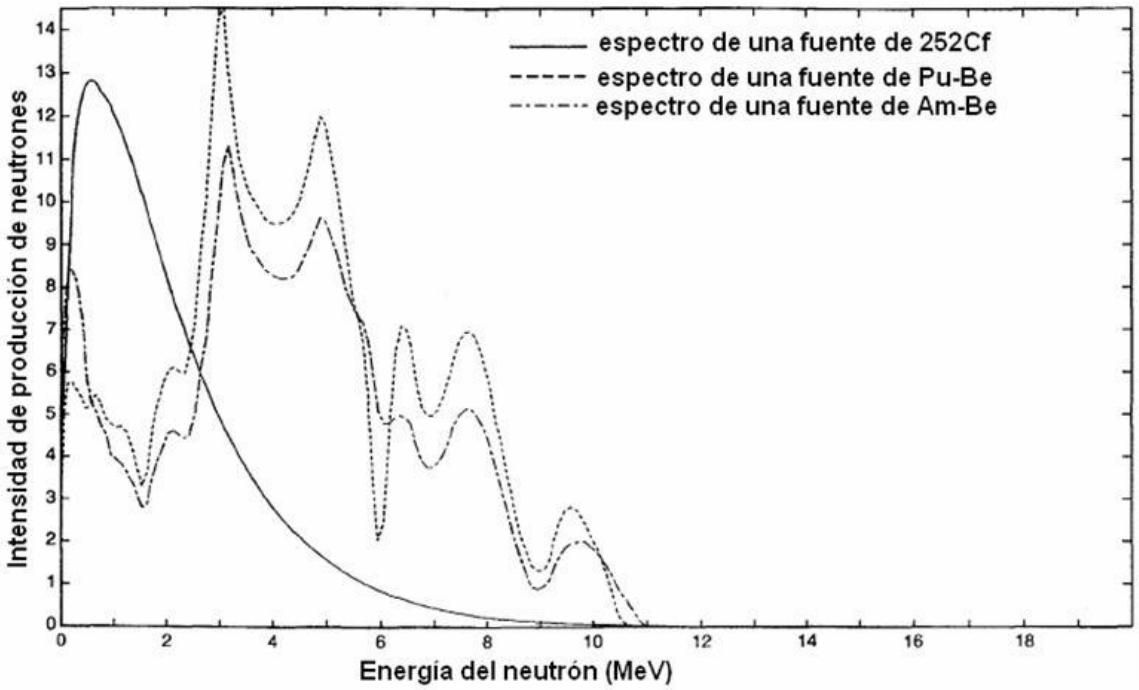


Figura 44. Comparación de los espectros de energía de fuentes isotópicas.

4.1.3.1. Fuentes isotópicas alfa neutrón.

Las fuentes isotópicas son muy útiles por que no implican unidades de alto voltaje, y son pequeñas, compactas y móviles.

Las fuentes isotópicas (α, n), consisten en una mezcla de isótopos radiactivos emisores de partículas alfa con núcleos ligeros. Las partículas alfa interaccionan con los núcleos ligeros, y emiten neutrones como resultado de una reacción (α, n) y (α, α').

Algunos elementos ligeros producen neutrones cuando son bombardeados con partículas alfa, por el decaimiento de elementos pesados. Por ejemplo, la emisión de neutrones por parte de elementos ligeros diferentes cuando son bombardeados por partículas alfa, a partir del decaimiento del ^{210}Po se muestra en la siguiente tabla:

Objetivo	Valores Q	Campo de neutrones por 10^6
^{7}Li	-2,79	2,6
^{9}Be	5,70	80
^{10}B	1,6	13
^{11}B	0,16	26
^{13}C	2,22	10
^{18}O	-0,70	29
^{19}F	-1,95	12

Tabla 37. Producción de neutrones en fuentes isotópicas.

Como puede verse de la tabla, el berilio da la mayor emisión de neutrones. Algunos de los elementos listados no pueden incorporarse directamente en una fuente, y sólo pueden usarse sus compuestos químicos. Esto reduce la emisión de neutrones.

El elemento ligero de uso más conveniente es el berilio, y prácticamente todas las fuentes de neutrones isotópicas fabricadas actualmente usan este elemento.

Una situación similar existe en el caso de isótopos pesados radiactivos alfa. Los principales requerimientos son, que la fuente de neutrones tenga una vida media suficientemente larga, y una emisión de rayos gama baja. Un compromiso razonable para estas dos premisas se encuentra en el caso del ^{239}Pu y el ^{241}Am. Esto explica por qué las fuentes isotópicas más usadas se fabrican en base a mezclas de ^{239}Pu-^{9}Be o ^{241}Am-^{9}Be.

Cuando se usan fuentes de neutrones isotópicas, es necesario tener en cuenta las variaciones de la emisión de neutrones con el tiempo, y las modificaciones en el espectro causadas por las interacciones de los neutrones dentro de la fuente.

Las correcciones respecto a la vida media se pueden tratar fácilmente, pero en el caso del ^{239}Pu, se tiene que saber las cantidades de ^{240}Pu y ^{241}Pu que están presentes en los materiales comerciales como impurezas. Se deben insertar las correcciones adecuadas respecto al decaimiento y al crecimiento.

La masa y la composición física de la fuente de neutrones pueden afectar, en alguna extensión, a su espectro. La causante las deformaciones del espectro son las siguientes:

- Las colisiones elásticas e inelásticas de los neutrones con la fuente;
- La fisión inducida por neutrones en el emisor alfa;
- La reacción ^{9}Be (n,2n);
- La reacción ^{9}Be (γ, n), (ocurre solamente con el ^{226}Ra);
- La reducción de la energía efectiva de las partículas α al ralentizarse las partículas alfa dentro del cluster del emisor alfa.

Para fuentes cuyas dimensiones no excedan de 2 cm., las tres primeras causas no deforman el espectro por más que existan incertidumbres. Para fuentes de dimensiones mayores, se debe esperar alguna amortiguación del espectro de neutrones.

Esta es una razón por la cual se prefieren fuentes de pequeño tamaño. Hay también otra razón por la cual se prefieren las fuentes pequeñas: la emisión de neutrones de tales fuentes es casi isotrópica, y no es necesario hacer correcciones a causa de los ángulos de emisión de los neutrones. Para fuentes mayores, las cuales tienen habitualmente forma cilíndrica, debe medirse la anisotropía angular de la emisión de neutrones y debe corregirse. En general, para fuentes cilíndricas, la emisión de neutrones es puntiaguda en dirección hacia las caras laterales, y es mínima en la dirección del eje del cilindro.

La distorsión del espectro por la última de las 5 causas listadas anteriormente, es una función del tamaño de los cluster del material emisor α. Éste, podría hacerse tan pequeño como fuera posible, y debería ser mucho más pequeño que la trayectoria de las partículas α emitidas.

El proceso de fabricación usualmente produce fuentes homogéneas en la forma de aleaciones, o mezclas de polvo muy finas (5-10 μm). Para tales fuentes, el espectro de neutrones es suficientemente reproducible.

4.1.3.2. Espectro de neutrones a partir de la fisión espontánea del californio 252.

El campo de neutrones debidos a la fisión espontánea del californio 252 es el único que es técnicamente fácil de realizar y reproducible con el mayor grado de fiabilidad. Esta es la razón por la cual el campo de neutrones del ^{252}Cf se ha escogido como un estándar internacional. Desde entonces, se han dedicado considerables esfuerzos para medir y calcular teóricamente este espectro.

4.2. Detectores de radiación gamma.

Para ser capaz de detectar la presencia de rayos gamma es necesario convertir la energía que contienen, en otra forma de energía, (corriente eléctrica, pulsos de luz o cambio químico. Un electrón voltio eV equivale a 1,6 10^{-19} W/s, así que 5 MeV son aproximadamente 8 10^{-13} W/s. Esto es una cantidad de energía muy pequeña y explica porqué las personas no podemos sentir esta radiación, comparado con los 5 W/s. que puede producir una bombilla eléctrica.

A escala atómica, no obstante, esto representa una enorme cantidad de energía, suficiente como para liberar cientos y miles de electrones. Estos electrones son medibles y observables. La medida directa de los electrones liberados sería una forma cuantitativa de detección, y es la forma más precisa de medir la radiación, pero están limitados por razones técnicas para pequeños volúmenes o detectores de baja densidad. Algunos ejemplos de este tipo están constituídos por CdTe, barreras de superficie de Silicio, y detectores de Si dopados con Litio. Estos pueden tener algunos cm de diámetro por mm de espesor.

Los detectores que pueden ser construidos en mayor tamaño y que son los más densos son los detectores de centelleo, que convierten la energía de la radiación entrante en un pulso de luz.

En primer término se mencionan detectores algunos de los cuales no tienen interés en el campo de la activación neutrónica de esta Tesis, y posteriormente se analiza el tipo de detector que se ha usado.

[1] Detectores de ionización gaseosa.

Están basados en la capacidad que poseen las partículas directa o indirectamente ionizantes de ionizar el medio con el que interaccionan. Si este medio es un gas, se crearán una serie de pares de iones que, en general, volverían a recombinarse sin ejercer ninguna acción. Pero si el gas se encuentra sometido a un campo eléctrico, los iones positivos y negativos tenderán a separarse y las cargas eléctricas podrán recogerse por medio de electrodos que darán lugar a una señal eléctrica, susceptible de ser medida. La amplitud de dicha señal es proporcional al número de iones recogidos en dicho bornes. La carga que se recoge es función de la tensión aplicada.

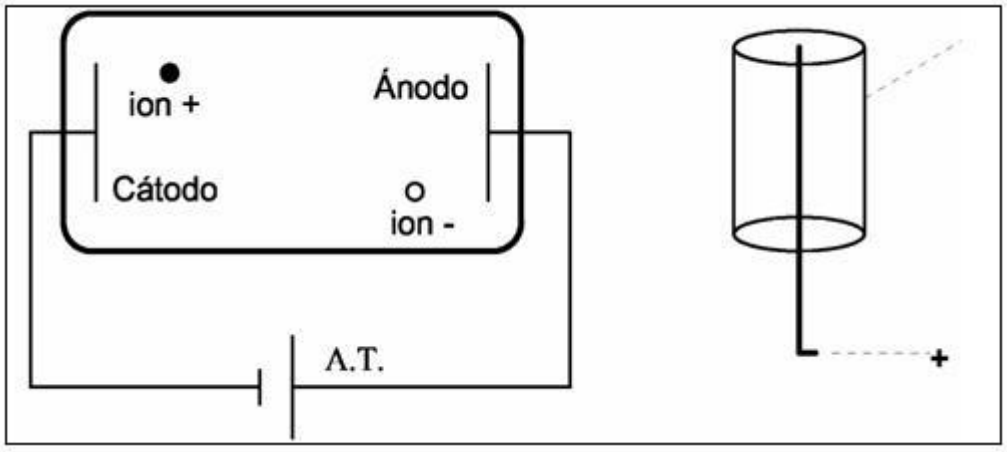


Figura 45. Representación esquemática de una cámara de ionización

Así pues, esquemáticamente, podemos representar, en función de la tensión y de la carga, los regímenes de funcionamiento de diferentes tipos de detectores gaseosos (Figura 46).

[2] Tubos Geiger- Muller.

La tensión de funcionamiento de un dispositivo llamado tubo de Geiger-Muller es del orden de 400 a 2.000 volt. Para estas tensiones, la ionización del gas se convierte en una avalancha de electrones que alcanzan el ánodo, lo que origina un impulso de corriente de gran amplitud pero que es independiente de la energía de la partícula incidente.

Esto se traduce en no poder determinar las características de la partícula incidente, es decir, si es γ ó ß. Estos dispositivos no disciernen la calidad de la radiación. Sin embargo, tienen la ventaja de que el impulso eléctrico que se origina es de una gran amplitud, por lo que no se hace necesaria una amplificación importante posterior, lo cual lleva a una simplicidad y bajo costo de la electrónica.

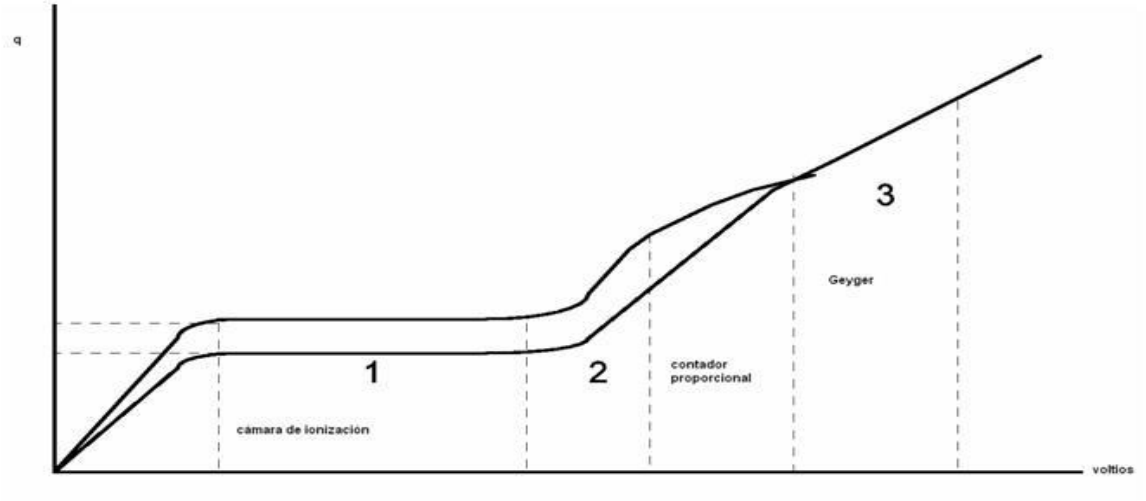


Figura 46. Diferentes regímenes de funcionamiento de los detectores a gas en función de la tensión aplicada.

Una vez alcanzada la tensión de funcionamiento del contador Geiger-Muller, la cantidad de impulsos por unidad de tiempo no depende del voltaje sino que es prácticamente constante. (Figura 47)

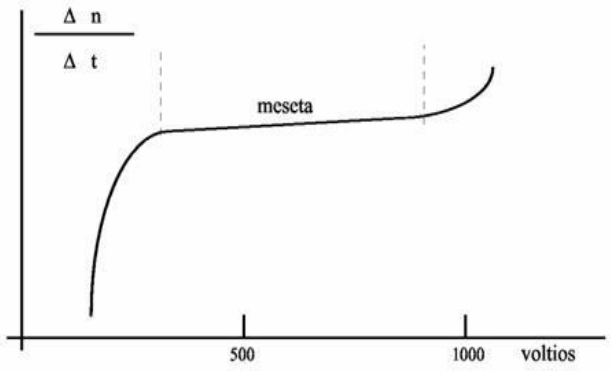


Figura 47. Régimen de funcionamiento de un detector Geiger-Muller.

[3] Cámaras de ionización abiertas y cerradas.

Cuando aplicamos una tensión que sea inferior a 400 V., los iones positivos producidos en el gas por la radiación incidente serán recolectados por el cátodo mientras los iones negativos o electrones serán colectados por el ánodo central.

El valor del voltaje depende del tipo de gas que lleva la cámara, de la presión a que esté sometida y del tamaño y geometría de los electrodos.

Así pues, el número de electrones colectados por el ánodo será igual al número producido por ionización primaria de la partícula incidente. El impulso que se recoja deberá ser independiente del voltaje

y dependerá únicamente del número de iones producidos en el gas por las partículas incidentes.

Las cámaras de ionización abiertas son aquellas en que la presión y temperatura ambiente influyen sobre la masa de aire que se encuentra en el interior de la cámara, por lo cual, al hacer una lectura, ésta deber ser corregida por presión y temperatura mediante el factor.

$$F = \frac{(273{,}2 + T_0)P}{(273{,}2 + T)P_0}$$

Donde t se expresa en grados centígrados y P en mm. de mercurio.

Este tipo de cámaras son las empleadas para la calibración de unidades de cobalto, rayos X y aceleradores. La cámara va unida a un electrómetro que mide la intensidad de la corriente y nos la transfiere en unidades de dosis. Las cámaras de ionización cerradas se emplean en medidas de dosis ambientales, como dosímetros personales, etc.... En ellos, el gas va cerrado herméticamente, por lo cual no hay que hacer corrección por presión y temperatura y son transportable fácilmente.

[4] Detectores de semiconductores.

Los semiconductores son sólidos cristalinos generalmente de Si o Ge, cuyas propiedades eléctricas los hacen apropiados para muy diversas aplicaciones, entre las que destaca como más importante la fabricación de los conocidos "chips".

Cuando un semiconductor es alcanzado por radiaciones ionizantes éstas liberan, al interaccionar, cargas eléctricas negativas (electrones) y positivas (huecos o agujeros), que dan lugar a un aumento de la conductividad del semiconductor. Por consiguiente, si el semiconductor está sometido a una diferencia de potencial, la corriente que circulará será proporcional a la tasa de exposición y la carga recogida será proporcional a la exposición. Por ello se utilizan este tipo de detectores, que tienen la ventaja de su sencillez y de su pequeño tamaño.

4.2.1. Detectores de centelleo.

Existen ciertas sustancias sólidas, en forma cristalina, que absorben la energía de las partículas que inciden sobre ella, originando en su interior la ionización y excitación de las moléculas de cristal.

Estos cristales tienen la propiedad de que al desexcitarse emiten centelleos de luz, fotones, susceptibles de ser medidos. La cantidad de luz que emiten es proporcional a la energía absorbida en el cristal. Uno de los más empleados es el Yoduro de sodio activado con Talio. Los detectores BGO (germanato de bismuto), tienen mejores características a altas energías. Otros materiales utilizados en detectores de centelleo son $LaCl_3$, dotado con Ce, y $LaBr_3$, también dopado con Ce.

Los detectores que funcionan de esta manera se conocen como detectores de centelleo y pueden ser construídos con materiales orgánicos (plásticos), o con materiales inorgánicos. Los plásticos se usan en la detección de rayos gamma, solamente cuando no se necesita información de la energía del fotón. Cuando es necesario conocer esta energía o la intensidad de los fotones, se utilizan detectores de centelleo inorgánicos de alto número atómico.

El funcionamiento de un detector de centelleo se explica en base a los procesos de interacción de los rayos gamma con el material del que está constituido el detector.

Cuando un rayo gamma penetra en el interior del detector pueden ocurrirle varias cosas:

- Que salga del detector sin haber sufrido ninguna interacción con la materia del detector.
- Que sí interactúe con la materia del detector. En este caso, hay varios tipos de interacción:
    - **Efecto fotoeléctrico**. En este caso, los rayos gamma incidentes se absorben totalmente por los *electrones* que están ligados a los núcleos atómicos del material. Como consecuencia de ello, los *electrones se expulsan* a gran velocidad a través del material. Los electrones portan la energía del rayo gamma absorbido menos la energía característica de sus ligaduras con el núcleo, que son del orden de unos cuantos cientos de eV. Pero, considerando que los rayos gamma portan una energía de miles de keV, podemos despreciar la energía de ligadura y decir que el electrón lleva prácticamente toda la energía del rayo gamma incidente. La probabilidad de que se produzca el efecto fotoeléctrico viene caracterizada por la sección eficaz microscópica, σ_f. Esta sección eficaz sigue aproximadamente la ley:

$$\sigma_f = k_f \cdot \frac{z^n}{E^3}$$

      Donde,

      z es el número atómico del material con el que interaccionan los fotones.

      E es la energía de los fotones o rayos gamma.

      k_f es una constante de proporcionalidad, y

      n un parámetro que oscila entre 3 y 5 según se trate de fotones de alta o baja energía.

    - **Efecto Compton**. Este efecto es consecuencia de una colisión entre el rayo gamma incidente y un *electrón* que se encuentra libre en el material. Este electrón porta una energía que *depende* del ángulo con el que fue dispersado el fotón. El máximo de la energía del electrón se obtiene cuando el ángulo de dispersión es de 180º. La sección eficaz microscópica Compton σ_c es:

$$\sigma_c = k_c \cdot \frac{z}{E}$$

      Donde,

      z es, igual que antes, el número atómico del material con el que interaccionan los fotones.

E es la energía de los fotones o rayos gamma.

k_c es una constante de proporcionalidad, y

La energía máxima $E_{\max}$ cedida a los electrones es:

$$E_{\max} = \frac{4E^2}{1+4E}$$

- **Creación de pares electrón – positrón**. Este proceso ocurre en el campo de un *núcleo* del material del detector, y corresponde a la creación de un par electrón – positrón a expensas de un fotón gamma incidente que desaparece en el mismo punto. Esto sucede cuando la energía del rayo gamma es superior a dos veces la masa del electrón, y tiene como consecuencia que se mueva un electrón a través del material. El positrón se aniquila muy rápidamente con otro electrón, produciendo nuevamente otro fotón gamma.

Todos estos procesos tienen como punto en común que liberan electrones muy energéticos a través del material. Los electrones se frenan transmitiendo su energía al medio circundante. Los átomos del detector, quedan excitados y, cuando decaen, producen un número de fotones proporcional a la energía del electrón.

La energía de estos fotones se encuentra en un rango que es compatible con la sensibilidad del fotocátodo. Por ejemplo, si el detector es del tipo de INa (Tl), la longitud de onda de estos fotones, se encuentra entre 350 y 450 nm. Si el detector es un detector BGO cuya fórmula es Bi_4GeO_{12}, la longitud de onda está comprendida aprox. entre 400 y 550 nm. El intervalo de longitudes de onda para el que es más eficiente el fotocátodo de BIALKALI, está comprendido entre 200 y 550 nm.

Por lo tanto, contando el número de dichos fotones, podemos conocer de forma indirecta la energía del rayo gamma incidente cuando éste es absorbido por efecto fotoeléctrico. También se pueden determinar otras propiedades a través del estudio de las características cinemáticas de los electrones que provienen del efecto Compton.

El detector de centelleo está constituido por el cristal de centelleo como el elemento más importante; pero no es el único elemento del detector, ya que este cristal está en el interior de una cápsula cuyas paredes interiores están recubiertas de una sustancia que tiene una alta reflectividad de la radiación luminosa, de manera que todos los fotones luminosos producidos en el interior del cristal se reflejan en las paredes y terminen en el fotocátodo.

En la Figura 48 se muestran las propiedades físicas de los cristales de centelleo inorgánicos más habituales.

Scintillator	Light yield (photons/keV)	Light ouput (%) of NaI(Tl) bialkali pmt	Temperature coefficient of light output (%/°C) 25°C to 50°C	1/e Decay time (ns)	Wavelength of maximum emission λm (nm)	Refractive index at λm	Thickness to stop 50% of 662 keV photons (cm)	Thermal expansion (/°C) x 10^{-6}	Cleavage plane	Hardness (Mho)	Density g/cm^3	Hygroscopic	Comments
NaI(Tl)	38	100	-0.3	250	415	1.85	2.5	47.4	<100>	2	3.67	yes	General purpose, good energy resolution
Polyscin® NaI(Tl)									none				Polycrystalline NaI(Tl), for extra strength
CsI(Tl)	54	45	0.01	1000	550	1.79	2	54	none	2	4.51	slightly	High Z, rugged, good match to photodiodes
CsI(Na)	41	85	-0.05	630	420	1.84	2	54	none	2	4.51	yes	High Z, rugged
CsI(pure)	2	4-6	-0.3	16	315	1.95	2	54	none	2	4.51	slightly	High Z, fast emission
BGO	8 - 10	20	-1.2	300	480	2.15	1	7	none	5	7.13	no	High Z, compact detector, low afterglow
BaF_2	1.8	3	0	0.6 - 0.8	220(195)	1.54	1.9	18.4	<111>	3	4.88	slightly	Fast component (subnanosecond)
	10	16	-1.1	630	310	1.50	1.9	18.4	<111>	3	4.88	slightly	Slow component
CaF_2(Eu)	19	50	-0.33	940	435	1.47	2.9	19.5	<111>	4	3.18	no	Low Z, α & β detection
$CdWO_4$	12 - 15	30-50	-0.1	14000	475	~2.3	1	10.2	<010>	4 - 4.5	7.9	no	High Z, low afterglow, for use with photodiodes
BrilLanCe® 350 $LaCl_3$(Ce)	49	70-90	0.7*	28	350	~1.9	2.4	11	<100>		3.79	yes	General purpose, excellent energy resolution
BrilLanCe® 380 $LaBr_3$(Ce)	63	165	0	16	380	~1.9	1.8	8	<100>		5.29	yes	General purpose, best energy resolution, rate of change of light output with temperature is small
PreLude® 420 $Lu_{1.8}Y_{.2}SiO_5$(Ce)	32	75	-0.29	41	420	1.81	1.1	--	none		7.1	no	Bright, high Z, fast, dense, background from ^{176}Lu activity
ZnS(Ag)	~50	130	-0.6	110	450	2.36	--	--	--	--	4.09	no	Multicrystal, 15μ stops 5.5 MeV α (n detection with ^{6}Li)
YAG(Ce), $Y_3Al_5O_{12}$(Ce)	8	15	--	70	550	1.82	2	~80	none	8.5	4.55	no	β–ray, X-ray counting, electron microscopy

Figura 48. Propiedades físicas de los cristales de centelleo inorgánicos más habituales. (Saint Gobain Crystals).

4.2.2. Otros detectores de centelleo.

a. Detectores de centelleo líquido.

Están basados en la propiedad de ciertos líquidos de emitir centelleos susceptibles de ser medidos. Así pues, en lugar de un cristal, disponemos de un líquido que al ser ionizado y excitado por la radiación incidente, emitirá centelleos susceptibles de ser medidos empleando un sistema de contaje y detección similar al de los cristales, con su fotomultiplicador y cadena de amplificación.

b. Detectores de termoluminiscencia.

Ciertos cristales, como el CaF_2(Mn) (fluoruro de calcio activado con manganeso) y como el LiF (fluoruro de litio), poseen la propiedad de emitir luz al ser calentados tras haber sido expuestos a la radiación. Se les denomina cristales termoluminiscentes. Al ser irradiados, la radiación va a excitar los átomos que constituyen el cristal, produciendo movimiento de electrones libres, que dejarán huecos en el cristal. Al ser éste calentado, volverá a su estado normal y la energía que había absorbido será emitida en forma de luz susceptible de cuantificarse.

La cantidad total de luz es proporcional al número de electrones excitados, que, a su vez, son proporcionales a la cantidad de energía absorbida de la radiación.

Para su lectura, el cristal se calienta y la intensidad de luz que emita es medida por un tubo fotomultiplicador, cuya señal de salida, una vez amplificada, se conecta a un voltímetro digital.

El instrumento de lectura se calibra midiendo intensidades de luz que emita al cristal tras ser sometido a intensidades de radiación conocida.

La respuesta de los dosímetros termoluminiscentes se extiende a lo largo de 0.1 mSv a 100 Sv.

c. Detectores de película fotográfica.

Las radiaciones impresionan las placas fotográficas y el grado de impresión es función de la intensidad e la radiaciòn que ha incidido. Esta propiedad de los mismos se emplea para dosimetría en radioterapia, para dosimetría personal, etc. ... La radiación ionizante, al incidir sobre la película, actúa sobre la emulsión, produciendo ennegrecimiento cuando se revela la placa. El grado de ennegrecimiento puede medirse con precisión mediante un densitómetro óptico, cuya lectura se expresa como el logaritmo de la intensidad de la luz transmitida a través de la película.

Conociendo la densidad óptica de una película sometida a cantidades conocidas de radiación, podremos conocer la de otra película que haya sido impresionada. (Figura 49).

Las películas que se emplean en dosimetría personal son fuertemente dependientes para valores de energía baja, del orden de 0,2 MeV para abajo. Esta dependencia de la energía proviene del hecho de que la sección eficaz para el efecto fotoeléctrico en la plata de las emulsiones fotográficas aumenta más rápidamente que en el aire o en el tejido para energías inferiores a 200 keV.

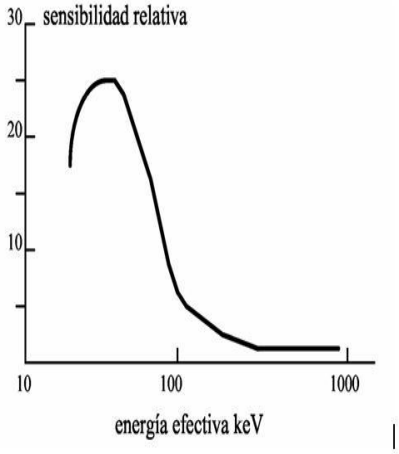


Figura 49. Dependencia energética del dosímetro de película fotagráfica frente a Rayos X.

Esta fuerte dependencia con la energía para valores inferiores a 200 keV., al no ser lineal, hace necesaria la interposición de filtros de aluminio, cobre, etc., para diferenciar la radiación en función de la energía.

4.3. Fotomultiplicador.

Para recolectar los fotones emitidos por el cristal se emplea un fotomultiplicador y una cadena de amplificación que nos permitirá medir esa intensidad de luz. El fotomultiplicador es un dispositivo que, al ser excitado por los fotones procedentes del cristal, emite electrones (efecto fotoeléctrico). Estos electrones son acelerados mediante una serie de dínodos (del orden 10) y finalmente recogidos en un ánodo, dando origen a un impulso eléctrico de breve duración que se somete a una cadena de amplificación.

El primer elemento del fotomultiplicador es el fotocátodo, que es el encargado de transformar los fotones de luz en electrones, que posteriormente se amplifican a través de los distintos electrodos del fotomultiplicador.

La mayor parte de los fotocátodos están hechos de compuestos de materiales semiconductores, y frecuentemente se basan en metales alcalinos.

Hay unos 10 tipos de fotocátodos en uso actualmente. Cada fotocátodo está disponible en dos versiones distintas: una semitransparente y otra opaca, con características diferentes. A principios de 1940, la JEDEC (Joint Electron Device Engineering

Council), introdujo el "Número S", para designar la respuesta espectral del fotocátodo.

Los materiales usados habitualmente para fotocátodos en tubos fotomultiplicadores son los siguientes: Cs-I, Cs-Te, Sb-Cs, BialKali (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs) SbNaK, Multialkali (Sb-Na-K-Cs), Ag-O-Cs, GaAs (Cs), InGaAs (Cs) y InP/InGaAsP (Cs), InP/InGaAs (Cs).

El fotocátodo está recubierto por una ventana. Los materiales de esta ventana se escogen de manera que tengan una transmitancia elevada a la radiación visible y ultravioleta. Los usados habitualmente son: MgF_2 cristalizado, Sapphire (Al_2O_3), sílice sintética, cristales UV y cristal de borosilicato.

4.4. El preamplificador.

La señal recogida por el fotomultiplicador tiene que ser recogida y amplificada antes de estar en disposición de registrarse y analizarse. La mayoría de los detectores se puede representar como un condensador en el cual se deposita una carga, según se muestra en la Figura 50.

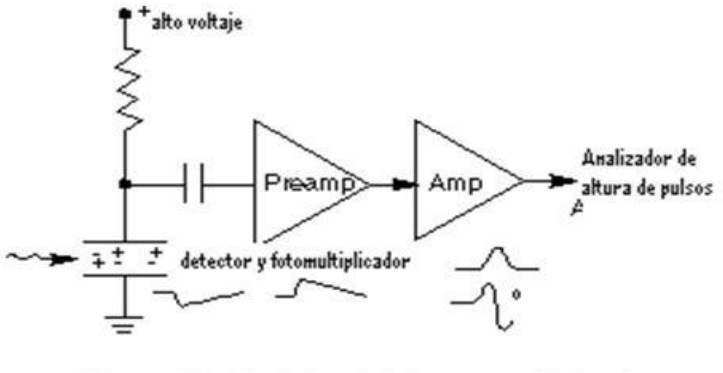


Figura 50. Detetor básico y amplificador.

En un bías situado en el detector, se crea un campo eléctrico que provoca la migración de los portadores de carga.

Durante la recogida de la carga, fluye una pequeña corriente, y el voltaje cae a lo largo de la resistencia del bías lo que se manifiesta como un pulso de voltaje.

El preamplificador está aislado del alto voltaje mediante un condensador. El tiempo de subida del pulso de salida del preamplificador, está relacionado con el tiempo de recogida de la carga, mientras el tiempo de decaimiento del pulso de salida del preamplificador, es la constante del tiempo característica del R. C. del mismo preamplificador.

Los tiempos de subida varían desde unos pocos ns a unos pocos microsegundos, mientras que el tiempo de decaimiento usualmente se ajusta a alrededor de 50 microsegundos.

La mayoría de los detectores de estado sólido utilizan normalmente preamplificadores sensibles a la carga. En los preamplificadores sensibles a la carga, se produce un pulso de voltaje de salida que es proporcional a la carga de entrada.

El voltaje de salida es independiente de la capacidad del detector, lo cual es importante especialmente en los detectores de silicio de partículas cargadas, mientras que la capacidad del detector depende fuertemente del voltaje del bías. Sin embargo, el ruido está también afectado por la capacidad.

Para maximizar las prestaciones, se debe colocar el preamplificador en el detector, para reducir la capacidad de la conexión, la cual puede degradar el tiempo de subida, así como disminuir el tamaño de la señal efectiva.

Además, el preamplificador también sirve para proporcionar un juego entre la alta impedancia del detector y la baja impedancia de los cables coaxiales que van al amplificador, el cual puede estar localizado a grandes distancias del preamplificador.

El amplificador sirve para dar forma al pulso y además para amplificarlo.

El largo tiempo de decaimiento del pulso del preamplificador puede hacer que el pulso no retorne hasta el voltaje cero antes de que ocurra un nuevo pulso, por lo que es importante acortarlo y solamente preservar la información del detector en la rampa de subida del pulso. Se puede usar la técnica de recorte RC; en esta técnica se identifica el pulso con objeto de eliminar el lento tiempo de decaída, e integrar el resto para reducir el ruido.

El pulso unipolar que resulta es mucho más corto. El circuito usado es un filtro activo para unas frecuencias seleccionadas. Se produce un pulso que tiene una forma casi gaussiana, manteniendo las características óptimas señal - ruido y las prestaciones de contaje.

Una segunda diferenciación produce un pulso bipolar. Este pulso bipolar tienen la ventaja de que sus áreas positivas y negativas son prácticamente iguales, de tal manera que el voltaje neto es cero.

Cuando un pulso bipolar pasa desde un punto de un circuito a otro a través de un condensador, no salen cargas del condensador entre pulsos.

Con un pulso unipolar, la carga debe fugarse a través de la resistencia asociada, o debe ser puesta a cero con un restaurador de la línea base.

Los pulsos típicos del preamplificador se muestran en la Figura 51. La línea discontinua en el pulso unipolar indica la presencia de disparos que pueden ocurrir cuando, estando midiendo contajes medios a altos, se produce una cantidad importante de pulsos de salida del amplificador que comienza a ascender en el disparo del pulso previo. Si no se corrige la salida, la amplitud de los pulsos medidos para estos pulsos, sería demasiado baja, y cuando se añade a los pulsos cuyas amplitudes son correcta, originarán un espectro más ancho de picos en el espectro adquirido. Para compensar este efecto, la cancelación polo-cero, rápidamente retorna el pulso al voltaje cero de la línea base.

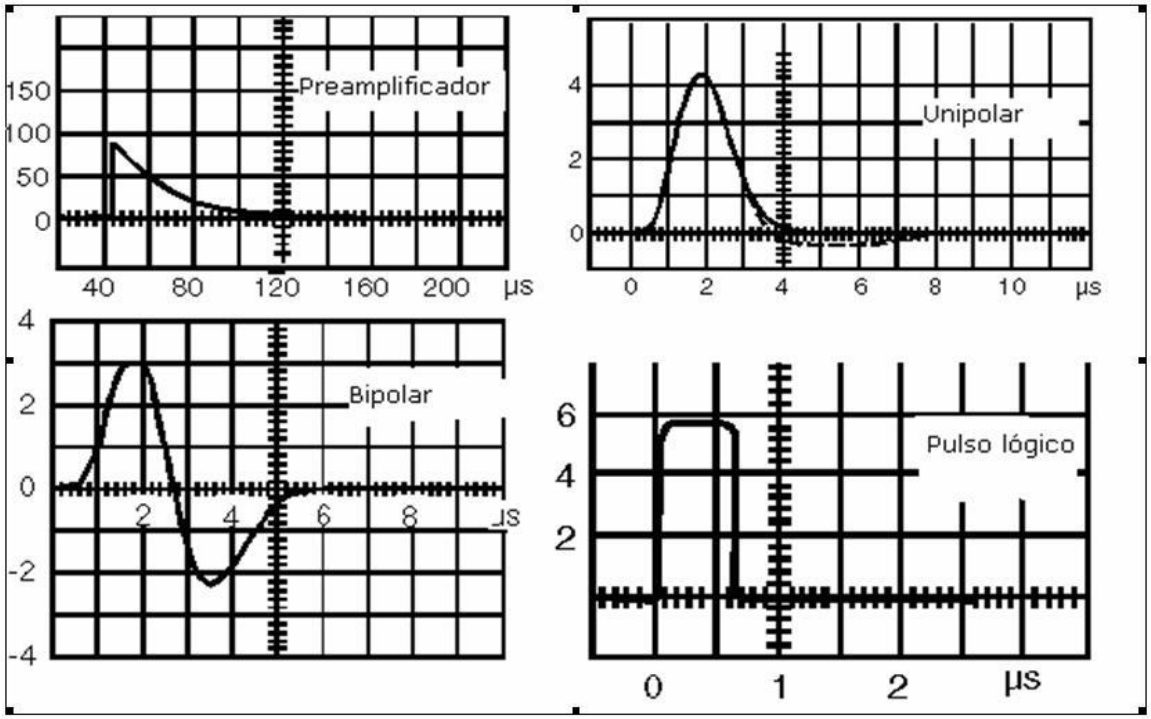


Figura 51. Pulsos típicos del preamplificador.

El pulso bipolar tiene otra ventaja sobre el pulso unipolar en que el punto de paso por cero es casi independiente del tiempo (relativo al comienzo del curso) para un amplio rango de amplitudes. Esto es muy útil en aplicaciones de tiempo. Sin embargo el pulso unipolar tiene menor ruido, y se han desarrollado discriminadores de la fracción constante para controlar el tiempo con pulsos unipolares.

El preamplificador asociado con los detectores de radiación realiza 3 funciones esenciales:

- Conversión de la carga a un pulso de voltaje
- Amplificación de la señal
- Modelado del pulso.

La mayor parte de los preamplificadores en uso son sensibles a la carga, y proporcionan una salida de pulso con una amplitud proporcional a la salida de la carga total procedente del detector.

Los preamplificadores de propósito general tienen una red de realimentación RC que da como resultado una función de salida cuasi paso. (quasi-step).

En los detectores de ruido extremadamente bajo Si(Li), y de baja energía HPGe, se elimina la resistencia de realimentación, y la señal de salida se convierte en una función de paso verdadero, con el cual se construye una función de escalera aleatoria, y se resetea por el circuito también llamado de realimentación de pulsado óptico.

Para muchas aplicaciones de alta resolución y altas cuentas, con detectores de germanio, el preamplificador de TRP (transistor reset preamplifier) ofrece las mejores características.

Un detector de germanio supone una fuente de impedancia extremadamente alta (10GΩ) capacidad apreciable (10-50 pF), y genera una pequeña carga (=5,4*10^{-14} Q), con la absorción de una partícula de un MeV.

$$Q = \frac{10^6 eV}{2{,}98 eV/q} * 1{,}6 * 10^{-19} \frac{C}{q} = 5{,}37 * 10^{-14} culombios$$

El evento total se mantiene durante periodos que van desde un ns a varios segundos.

En la actualidad la técnica más eficaz para adaptarse a estas características de detector es un preamplificador sensible a la carga con entradas de transistor de efecto campo (FET).

Un FET, es un equipo de bajo ruido inherente, el cual se puede optimizar a través del diseño del circuito, la preparación y la selección para una ganancia alta y un bajo ruido para fuentes de detector de alta impedancia.

La carga de entrada se integra en el preamplificador sensible a la carga, para originar una salida equivalente, tanto a la cantidad total de carga de entrada, como a la duración del evento. El sistema sensible a la carga, es útil tanto para espectroscopía de tiempo como de energía.

Aunque se cuide escrupulosamente el diseño del circuito del preamplificador para minimizar el ruido, hay factores externos que contribuyen directamente a la producción de ruido. La capacidad de entrada es el factor más importante. Esto requiere que sea escogido cuidadosamente el detector, seleccionando aquel que se ajuste mejor a la aplicación.

Los conectores del preamplificador al detector también añaden una capacidad de entrada. Por esta razón, se deben conectar los preamplificadores al detector, de la manera más directa posible.

La capacidad de entrada afecta no solamente la resolución de energía del sistema detector añadiendo ruido, sino también a la resolución en tiempo. Este tiempo depende del tiempo de subida de la carga de entrada total.

Capacidad de entrada en pF	***Carga de ruido en Culombios***	***Anchura del pico a mitad de la altura (FWHM) en detector de germanio (eV)***
0	3,06*10^{-17}	570
10	3,92*10^{-17}	730
30	5,69*10^{-17}	1060
50	7,24*10^{-17}	1350
100	1,18*10^{-16}	2200

Tabla 38. Relación entre el ruido, la capacidad de entrada, y la resolución del detector.

Al aumentar el ruido y la capacidad de entrada disminuye la discriminación del tiempo de subida, de ese modo se reduce la resolución del tiempo, es decir, aumenta la anchura del pico, como se ve en la Tabla 38.

Siempre ha sido un compromiso para los diseñadores de preamplificadores, el lograr una ejecución en la que pueda haber contajes altos, con ruido bajo.

La resistencia de realimentación interna del preamplificador y la resistencia bias del detector deben ser tan grandes como sea posible para disminuir su contribución al ruido.

Hacer esto, sin embargo, limita la respuesta de cuentas del preamplificador. Gracias a mejoras en los circuitos y a los grandes avances en la tecnología de equipamientos de semi conductores y otros componentes se han originado nuevas y continuas mejoras en la familia de preamplificadores de espectroscopia.

Para aplicaciones de espectroscopía de alta resolución, y bajo ruido, se utiliza en detectores de partículas cargadas de germanio o sílice, que necesitan preamplificadores de bajo ruido.

En algunas aplicaciones, el tiempo de la señal de salida es el parámetro más importante. El preamplificador necesita ser más rápido que el tiempo de recogida de la carga en el detector, por lo que un se necesita una velocidad extra, renunciando incluso a la estabilidad, la ganancia, y el ruido.

4.5. El amplificador.

Cuando se configura un sistema, el módulo de procesado de la señal que es necesario escoger con más cuidado es el amplificador. En el amplificador se deben seleccionar el rango de la ganancia, las constantes de tiempo de moldeado, el diseño de bajo ruido, y otras características, según el tipo particular de detector que se esté usando, y la aplicación para la que se le esté dando. De hecho, la amplificación es la función menos trascendente de un amplificador espectroscópico nuclear, por lo que un término más correcto para este instrumento debería ser un procesador de la señal.

El principal papel de un amplificador es convertir la señal de salida del preamplificador en una forma más adaptada para la medida que se desea. Ya que hay numerosas aplicaciones y características de la señal, también hay muchas técnicas de tratamiento de la señal para optimizar según el tipo de aplicación.

Algunos amplificadores se diseñan para ser lo suficientemente flexibles como para manejar diversas condiciones de medida, mientras otros se ajustan para optimizar una medida específica.

Todos los amplificadores tienen una cosa en común, y es que deben ser capaces de procesar la información en forma de pulsos. La Figura 52 A ilustra la señal de salida del preamplificador, cuyo borde de ataque contiene la información respecto a la energía y al tiempo deseada.

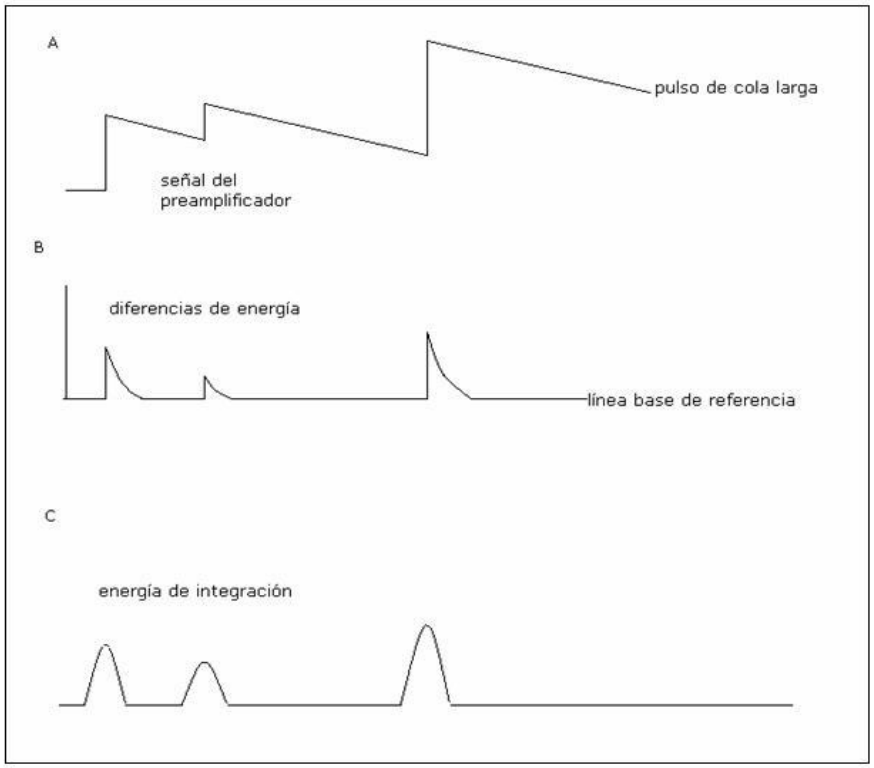


Figura 52. Pulsos típicos del amplificador.

El borde posterior de la señal del preamplificador decae lentamente hasta la línea base dando lugar al término "pulso de cola larga".

Como cada pulso nuevo puede darse en la cola del pulso anterior, la primera tarea del amplificador es restaurar el nivel de referencia de la línea base de cada pulso por diferenciación según se ve en la Figura 52 B.

Después de la diferenciación, se integra la señal para reducir el ruido, permitiendo una determinación más precisa de la amplitud. En la práctica, la diferenciación y la integración se ejecutan al filtrar desde la señal los componentes de frecuencias seleccionadas.

Según esto, las características de frecuencias de los filtros empleados se deben seleccionar para preservar la integridad de la información y para mantenerse la referencia de la línea base entre eventos.

En este punto, se debe alcanzar un compromiso: si se reduce la constante de tiempo del amplificador para proporcionar un retorno rápido a la línea base, se degrada la calidad de la señal cuando se trabaja con contajes altos, pues permite el paso de demasiado ruido a través del amplificador. Contrariamente, si se alarga la constante del tiempo de integración para reducir el contenido de ruido de la señal y mejorar la resolución, el pulso resultante se hace más ancho, permitiendo la posibilidad de cambiar la línea base al producirse el atropello de los eventos entre sí.

Se consigue una solución de compromiso al usar filtros simples resistencia-condensador RC. El filtro activo, sin embargo, nos permite confeccionar la respuesta de frecuencia de las redes. Al hacer un pulso

de forma casi gaussiana, a través de filtros activos selectivos, se consigue una fuerte mejora respecto a los filtros RC respecto a la relación señal-ruido, la simetría del pulso, y la realización del contaje.

El método de modelado del pulso tradicional, el modelado gaussiano, proporciona características señal ruido excelentes, a la par que mantiene el aspecto del tiempo. Esta técnica implica una diferenciación de pulsos seguida por varias etapas de filtrado de integración activa, todo ello ajustado a la misma frecuencia de corte, (la constante de tiempo de modelado). Así el instrumento se convierte en un amplificador-filtro paso banda estrecho.

Algunos amplificadores también ofrecen modelado triangular. Para este método, las señales de cada etapa de integrador se suman con un apropiado factor de ponderación, produciendo una señal de salida unipolar semi-triangular.

El modelado triangular tiene, inherentemente, un tiempo de subida más largo, para mejorar la relación señal-ruido, y reducir la sensibilidad a las variaciones de tiempo de subida del detector.

También, al aumentar el tiempo de procesado de la señal, aumenta eficazmente el tiempo de modelado, y se consigue mejorar la resolución, lo cual es muy interesante en muchas aplicaciones espectroscópicas de alta resolución.

Al dividir pulsos de energías sucesivas con cualquier método de modelado, aparece otro factor que debe ser tratado correctamente para conseguir una mejor ejecución del amplificador: la estabilización de la línea base.

La estabilización de la línea base normaliza el pulso de salida unipolar a una referencia dc, (usualmente, 0 voltios dc), para garantizar que los pulsos sucesivos puedan ser cuantificados con precisión en los instrumentos posteriores. El término más apropiado para este proceso es el de restauración de la línea base, y la eficacia en la restauración de la línea base del amplificador, determina su utilidad en espectros de contaje alto.

El mayor desafio en el diseño de los amplificadores, es la búsqueda del equilibrio entre la complejidad y al coste.

4.6. Convertidor analógico digital (ADC).

En general, en un convertidor analógico digital se genera una palabra digital proporcional a la amplitud de un pulso de entrada.

En aplicaciones nucleares, se usan los convertidores analógicos digitales para digitalizar las señales de salida de los amplificadores espectroscópicos. Como estos amplificadores generan pulsos de salida cuyas amplitudes son directamente proporcionales a las energías de la radiación incidente, se pueden usar los convertidores analógico - digitales junto con un amplificador y un analizador multicanal, para generar la distribución de energía, es decir espectro, de las muestras radiactivas.

Hay 2 tipos de convertidores analógico – digitales:

- los convertidores analógico digitales de Wilkinson y

- los convertidores de tiempo muerto fijado, los llamados FDT.

[1] El convertidor analógico digital Wilkinson.

El convertidor analógico digital Wilkinson, digitaliza un pulso al cargar un condensador hasta la amplitud de la señal de entrada. El condensador entonces se descarga a velocidad constante hasta que la rampa de voltaje retorna a una línea base de referencia. El tiempo de descarga del condensador, determinado por un reloj controlado por cristal, y un registrador, es directamente proporcional a la amplitud de la señal de entrada. El número registrado, representa la altura de pulso de la señal de entrada. Este proceso se indica esquemáticamente en la figura siguiente (Figura 53).

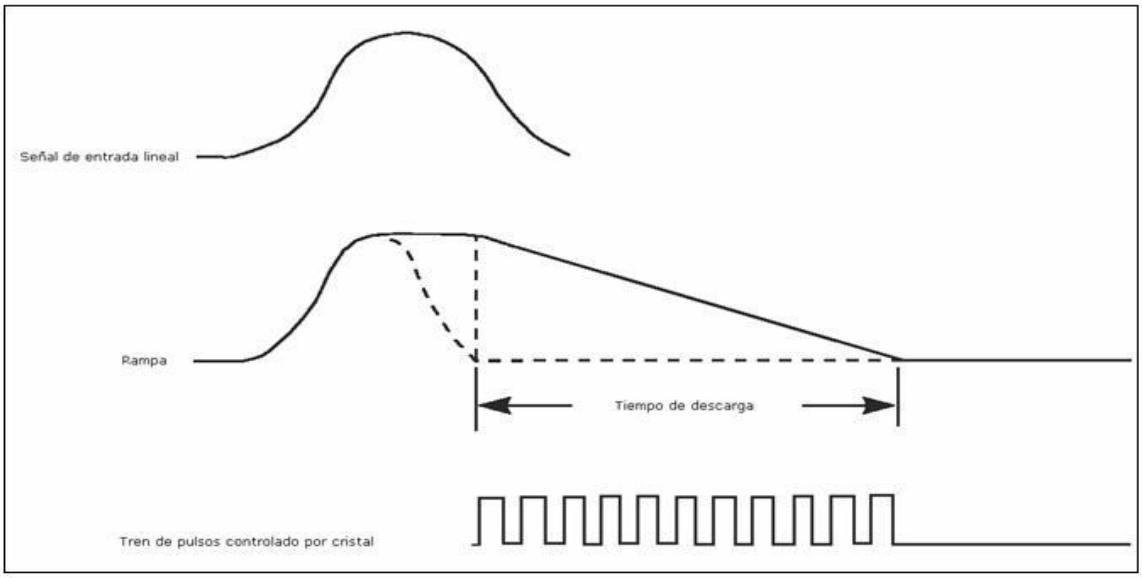


Figura 53. Rampa y tren de pulsos de un ADC.

[2] Convertidor analógico digital de tiempo muerto prefijado.

El convertidor de tiempo muerto prefijado, FDT, (a veces también llamado convertidor de tiempo de conversión prefijado), usa aproximaciones sucesivas para digitalizar su señal de entrada.

Al contrario que el convertidor de Wilkinson, el convertidor FDT ejecuta un número determinado de comparaciones para definir el valor digital de la señal.

La técnica de aproximaciones sucesivas compara la entrada analógica con un voltaje de referencia variable (voltaje de comparación).

Este voltaje se genera en un convertidor digital analógico que está alimentado por una tensión de referencia y un registrador de aproximaciones sucesivas, conocido por SAR.

El voltaje de comparación generado es proporcional al valor numérico de la palabra contenida en cada instante en el SAR.

En el proceso de medida, el contenido de la palabra que está en el registro SAR, se modifica con cada cambio de la señal del reloj.

Antes de iniciar la medida, todos los bit del registro SAR están a 0. Se comienza la medida, activando el bit de más peso. Con cada cambio de la señal del reloj, se van activando, es decir, poniendo a uno, sucesiva y ordenadamente, los bit de menos peso. En cada cambio de la señal de reloj, se contrasta el voltaje de comparación, con la tensión de entrada, y en función del resultado se mantiene el valor del bit que se está comprobando, o se pone a 0.

Cuando, como resultado de la comparación, se comprueba que la tensión de entrada es mayor que la tensión de comparación, se mantiene activado el bit. En caso contrario, se pone el bit a 0.

Este proceso se repite hasta que se hayan comprobado todos los bits.

Cuando se completa el proceso, la palabra digital contenida en el SAR, representa el valor de la tensión de entrada medida.

La Figura 54 ilustra el principio de las aproximaciones sucesivas, y la Figura 55 muestra el proceso de conversión analógico digital del proceso FDT.

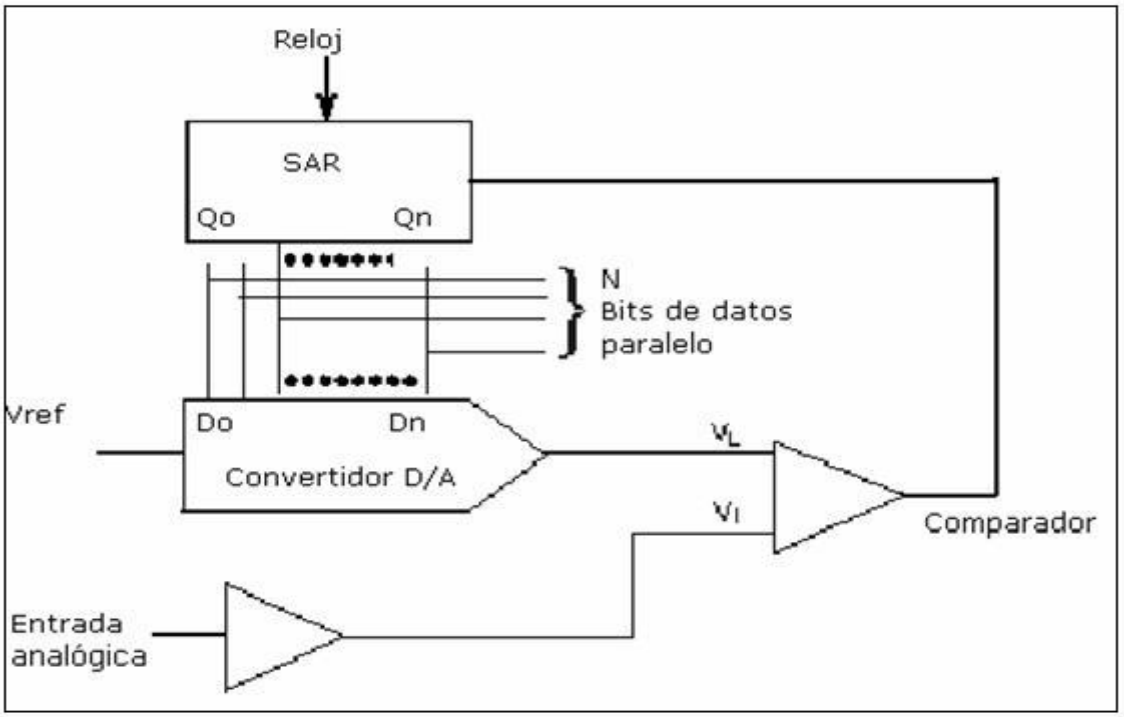


Figura 54. Principio del convertidor ADC del tipo FDT.

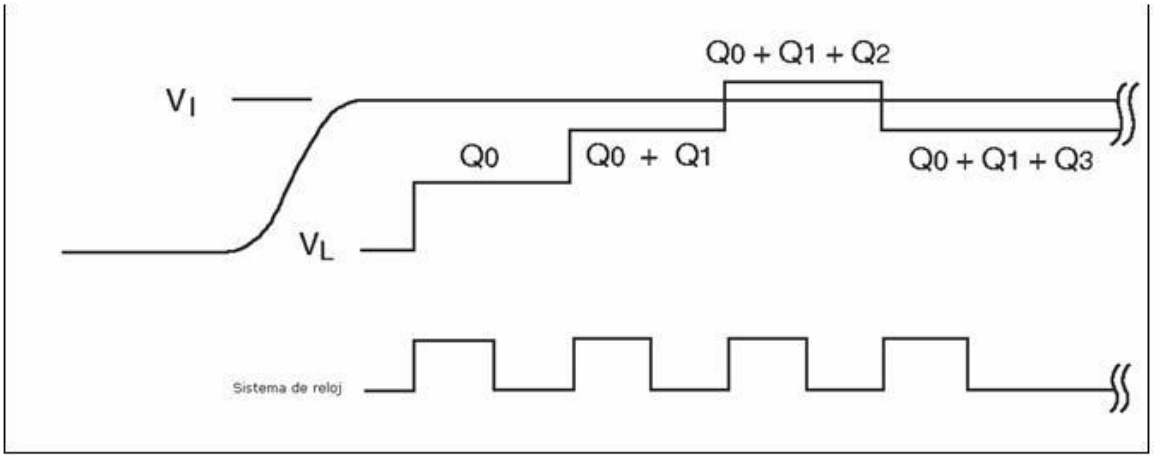


Figura 55. Proceso de conversión FDT.

4.6.1. Características de los convertidores analógico digitales.

Se describen las características relativas a los convertidores analógico digitales:

[2] La pendiente de la rampa.

[3] El número de canales.

[4] Resolución de un convertidor analógico digital.

Se define la resolución como una capacidad, propia del equipo, de diferenciar 2 picos de energías muy próximas. De esta manera, cuanto más próximos sean los picos que sea capaz de distinguir el equipo, mejor es su resolución. Normalmente, la resolución de un convertidor analógico-digital se define en término de canales, y representa el número de incrementos discretos de voltaje, en que se ha dividido el rango de medida.

Aunque el rango de entrada puede ser cualquier voltaje, la mayoría de los convertidores analógico digitales, se diseñan para ser compatibles con la salida de los amplificadores espectroscópicos nucleares.

[5] Ganancia de la conversión.

La ganancia del convertidor analógico digital o ganancia de la conversión, es el número de niveles de voltaje discretos (o canales), en que se ha dividido la entrada en la escala total del convertidor.

La ganancia de conversión del convertidor analógico digital es similar a la resolución del convertidor analógico digital, aunque naturalmente, puede tener un valor numéricamente igual o inferior.

Si bien la resolución es la capacidad máxima del convertidor analógico digital, la ganancia se refiere a la resolución efectiva seleccionada para una aplicación determinada.

Por ejemplo, si la resolución es de 8192 canales, la ganancia puede ser, (Tabla 39):

Coeficiente de ganancia Factor por el que se multiplica la resolución del convertidor	***Ganancia de la conversión o "Resolución efectiva" Nº de canales***
1	8192
½	4096
¼	2048
1/8	1024
1/16	512
1/32	256
1/64	128

Tabla 39. Ganancia de un ADC para una resolución de 8192 canales.

Normalmente, las aplicaciones en las que se usan los detectores de yoduro de sodio, requieren ganancias de conversión de 512 o 1024 canales, ya que normalmente se usan en aplicaciones simples, mientras que las aplicaciones en las que se usan detectores de germanio, utilizan ganancias de la conversión de 4096 o 8192 canales, puesto que estos detectores normalmente se utilizan en aplicaciones más sofisticadas en las que en interviene varios nucleídos.

Dependiendo del modelo concreto, existe un conmutador rotativo que se usa para seleccionar la ganancia. Frecuentemente, los valores que pueden seleccionarse son: 512, 1024, 2048, 4.096, 8192 y posiblemente 16.384 canales, (por ejemplo, de 8 a 14 bits respectivamente) para un nivel de señal de entrada de cero a 10 voltios.

[6] Rango.

Se denomina rango a un número, seleccionable en el convertidor analógico digital, generalmente a través de un interruptor rotativo, que corresponde a la dirección del canal, asignado al valor más alto de la amplitud del pico de tensión que se puede medir, en general, 10 voltios.

[7] Ajuste digital. "offset"

El ajuste digital, también llamado offset, es la capacidad de restar un número de canal determinado del número de canal convertido (o direcciones) antes de que se acceda a la memoria.

En otras palabras, es la forma digital de cambiar el canal cero del convertidor analógico digital. Cambia el espectro completo esa cantidad seleccionada.

Es equivalente a usar un amplificador parcial, "biased", pero tienen la ventaja de ser digital.

El ajuste digital se usa frecuentemente en espectroscopía alfa, para eliminar los valores de energía más baja, y expande los valores de energía a mayores hasta la memoria completa. El ajuste digital se usa también para recoger datos con alta resolución, con una asignación de memoria de analizador multicanal pequeña.

Por ejemplo, con una ganancia de un convertidor analógico-digital de 8192 canales, y un analizador multicanal de 1024

canales, el ajuste digital de 7168, permite recoger datos por encima de la 8ª parte del espectro.

Por ejemplo un convertidor analógico-digital que tenga una resolución de 8192 canales,

- tiene las distintas ganancias:256, 512, 1024, 2048, 4096 o 8196 canales,
- un rango, es decir, un límite superior de la dirección de salida, de 256, 512, nivel 24, 2040 y 8, 4096, o 8122 canales.
- y un offset que varía de cero a 8064 canales en múltiplos de 128.

[8] El tiempo de conversión.

El tiempo de conversión de un convertidor analógico-digital es el tiempo que se requiere para cambiar una señal de entrada de un voltaje analógico a un número digital. Depende de la frecuencia, del número de canales, de la amplitud del pulso, y del offset. A continuación se analizan separadamente cada uno de estos efectos.

- Influencia de la frecuencia de conversión.

En el caso de convertidor analógico digital del tipo de Wilkinson, a mayor frecuencia de reloj, menor es el tiempo de descarga *para el mismo número de canales*, y menor es el tiempo muerto. Figura 56.

La frecuencia de reloj es una característica fija del equipo, por ejemplo 100 megahercios.

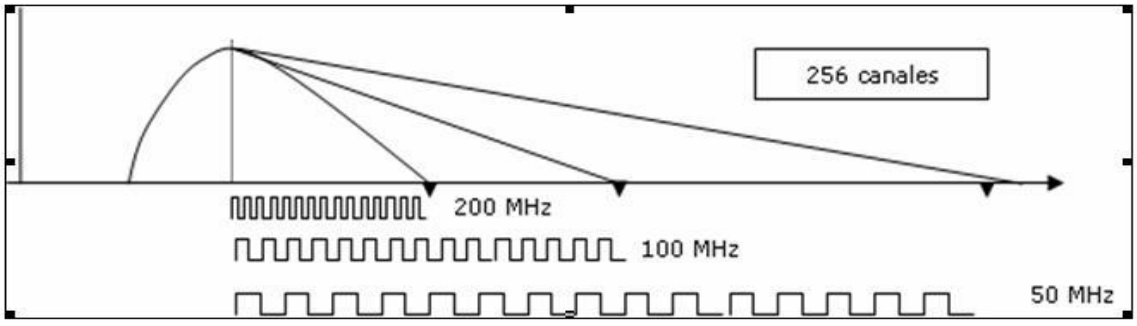


Figura 56.Distinta frecuencia e igual número de canales.

- Influencia del numero de canales seleccionado en la ganancia

De la misma forma, para la misma frecuencia de reloj, cuando se seleccionan un número u otro de canales se modifica la rampa de descarga del condensador, de tal manera que se consigue alcanzar la línea base con un número de pulsos de reloj igual al número de canales seleccionado. Ver Figura 57.

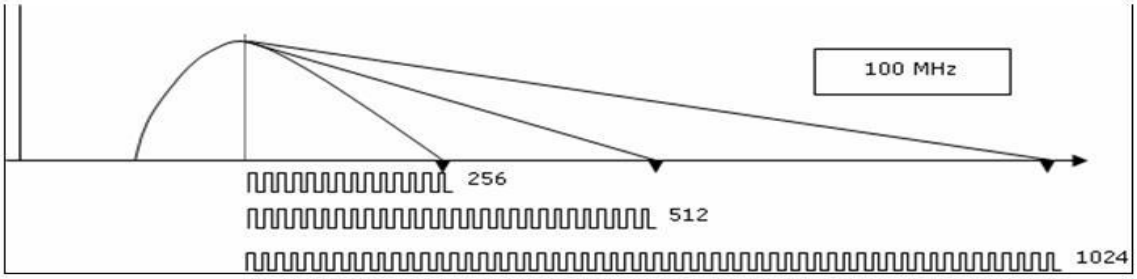


Figura 57. Distinto número de canales y la misma frecuencia.

- Influencia de la amplitud del pulso en el tiempo de lectura

En la Figura 58 se muestran pulsos de varias amplitudes, donde puede verse como el tiempo de conversión es directamente proporcional a la amplitud del pulso, para una ganancia dada.

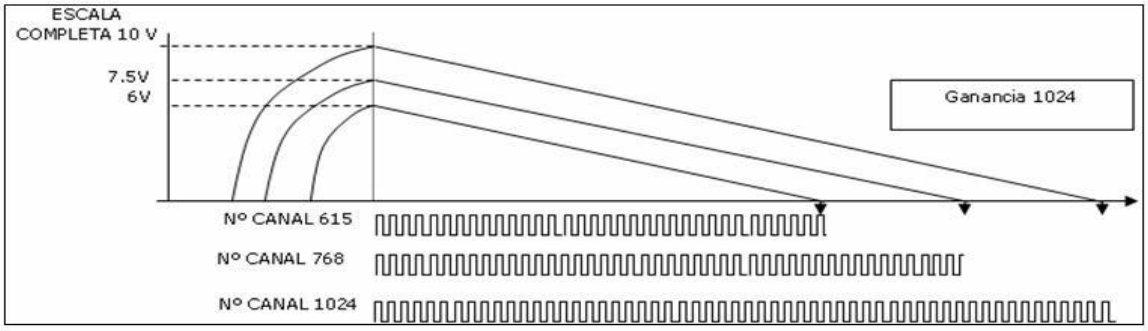


Figura 58. Igual frecuencia y distinta altura del pulso.

- Influencia del offset seleccionado.

Según se puede ver en la Figura 59 el tiempo de conversión es función de la suma del canal leído o almacenado, más el offset seleccionado.

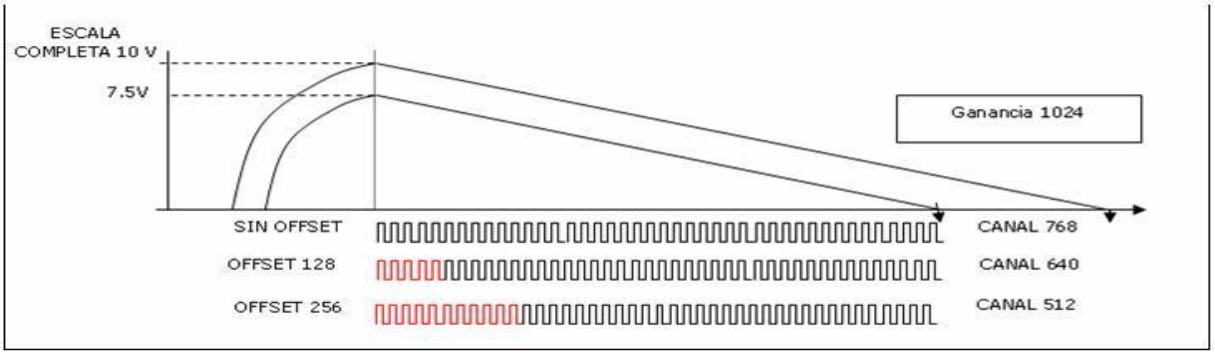


Figura 59. Distinto offset.

[9] El tiempo muerto.

El tiempo muerto es el tiempo en el cual el convertidor analógico digital está procesando un pulso, y es incapaz de aceptar otro.

El tiempo de conversión para un convertidor analógico digital Wilkinson de 100 megahercios viene dado por la ecuación:

$$\text{Wilkinson (T)} = 1.5\ \mu s + 0.01\ (N+X)\ \mu s$$

Donde: N = dirección de memoria.

X = offset digital efectivo.

El término 1,5 microsegundos de la fórmula anterior muestra la generación de la rampa, ver Figura 53.

El tiempo total de conversión es mayor que el tiempo definido por la ecuación anterior, ya que debe incluir la anchura del pulso de entrada. Este término se conoce como el tiempo de puerta lineal.

Puede verse en la ecuación que el tiempo de conversión verdadero de un convertidor analógico digital Wilkinson es función de la amplitud del pulso. Sin embargo, el tiempo de conversión es también función de la ganancia de conversión seleccionada, como ya hemos visto anteriormente.

Para ganancias de conversión pequeñas, tales como 256, 512 o 1024 canales, la ecuación da tiempos de conversión de aproximadamente 4.1, 6.6 y 11.4 µs respectivamente.

Sin embargo, en aplicaciones reales, el tiempo de conversión medio es menor, porque estadísticamente puede comprobarse que para la mayoría de las aplicaciones, el número de canales convertidos medios, (direcciones), se localiza aprox. al 30% de la ganancia de conversión de la escala completa.

En contraste, las características de los convertidores analógicos digitales de tiempo muerto prefijado, con un tiempo de conversión fijo, depende de la cantidad de comparaciones realizadas, y no de la amplitud del pulso de entrada. Para una ganancia de conversión de 8192 canales, la cual convierte realmente entre cero y 8191-canales, se requiere 12 comparaciones para determinar el número de canal convertido (direcciones).

Como la cantidad de tiempo que se requiere para realizar las comparaciones se conoce por el diseño, la cantidad total de tiempo de conversión fijado es también conocida. Aunque el usuario seleccione ganancias menores que la resolución del convertidor analógico digital, se hará siempre el mismo número de comparaciones, desechandose los bits menos significativos.

El tiempo muerto de un convertidor analógico digital del tipo FDT es igual al tiempo de puerta lineal más el tiempo de conversión.

Generalmente, el tiempo muerto prefijado es útil en aplicaciones de alta a moderada energía que requieren ganancias de conversión de escala completa de 4096 canales o mayor. Igualmente, los convertidores analógico digitales del tipo FDT son útiles en aplicaciones con altos contajes.

[10] Tiempo muerto vs tiempo vivo.

Se define como tiempo muerto al tiempo que el instrumento está ocupado procesando una señal de entrada, y no es capaz de aceptar otra entrada.

Como el tiempo muerto alto es un parámetro indeseable, todos los equipos disponen de mecanismos para intentar reducirlo lo máximo posible. Algunos "multicanales", disponen de un registrador de almacenamiento de la conversión, el cual permite al convertidor procesar el pulso con posterioridad, mientras se incrementa la memoria del multicanal.

El tiempo muerto de los convertidores analógico digitales, expresado usualmente como un porcentaje, se indica en un gráfico de barras que se encuentra en el panel central de la mayoría de los convertidores analógico digitales.

El tiempo vivo es el tiempo durante el cual el convertidor analógico digital no está ocupado procesando la señal.

El tiempo real, también llamado verdadero es el tiempo de reloj.

El multicanal compensa el efecto producido por el tiempo muerto, al hacer que los datos adquiridos se refieran al tiempo vivo, en vez de al tiempo verdadero.

Así la mayoría de los multicanales se pueden ajustar para medir en tiempo vivo o en tiempo verdadero (real).

[11] Linealidad.

La linealidad es un concepto que se utiliza para medir la relación entre la altura del pulso de entrada al convertidor analógico-digital y el valor numérico obtenido tras el proceso de conversión.

Se definen dos términos: linealidad integral y linealidad diferencial.

- La linealidad integral se refiere a la desviación que experimenta, respecto a una solución lineal, la relación entre el número de canal y la altura de pulso.
- La no linealidad diferencial, se puede describir cómo la variación en la anchura de canal de un número de canal a otro.

Los valores típicos son menos de 0,025%, aprox. para la no linealidad integral, y menos de 1%, para la no linealidad diferencial. Los modernos "multicanales" tienen una función de calibración de la energía que proporciona una escala de calibración lineal para el eje de las energías, la exactitud de

la cual, depende de la linealidad del convertidor analógico digital, y del sistema detector asociado.

En sistemas nucleares, con detectores de alta resolución, los errores resultantes de la no linealidad, son más aparentes, y no parece que sea adecuada, una calibración lineal. En este caso, se usarán algoritmos más complejos, y sistemas de análisis multicanal más sofisticados, que pueden ser calibrados usando ecuaciones cuadráticas de la forma:

$$E=A*Cn^2+B*Cn+C$$

donde,

E=Energía

A, B, y C = Parámetros de calibración

Cn = número de canal

Esta fórmula describe de una manera más exacta el tipo de no linealidad encontrada en experimentos con detectores de yoduro de sodio, y por eso permite un mejor ajuste de la escala de la energía a la escala representada.

[12] Puerta de coincidencia y anticoincidencia.

Para permitir el control del tiempo de escucha del sistema multicanal los convertidores suelen estar dotados de una entrada en la cual, a través de un pulso, se determinan los tiempos en los cuales el multicanal está escuchando.Se tienen las siguientes definiciones:

- Puerta de coincidencia/anticoincidencia

  Puerta a través de la cual se controla la aceptación o no de pulsos de entrada de señal.

- Coincidencia

  Pulso lógico para disparar la aceptación de una entrada de señal de proceso.

- Anticoincidencia.

  Pulso lógico para disparar el rechazo de una entrada de señal de proceso

El convertidor analógico digital también proporciona un disparo de coincidencia y anticoincidencia. Si se usa este sistema, la mayoría de los convertidores analógico digitales requieren que el pulso de disparo sea de menos de 250 ns de anchura.

En coincidencias tempranas, el pulso de disparo puede ocurrir mientras está cruzando el umbral de entrada. Para coincidencias tardías, el pulso de disparo puede ocurrir durante el tiempo en que está abierta la puerta lineal del convertidor analógico digital, esto es, durante el tiempo de adquisición del convertidor, durante el tiempo en que la señal de entrada cruza el discriminador del umbral al punto donde alcanza el pico máximo y cae al 90% de la altura del pico, tal como muestra la siguiente figura.

Algunos convertidores analógico digitales permiten mantener la puerta lineal abierta durante periodos de tiempo largos necesarios para hacer el disparo de coincidencia, mientras en otros casos, se puede necesitar retrasar las señales de entrada del convertidor analógico digital. El pulso de disparo debe ser compatible TTL; que es adecuado para un pulso de salida Standard SCA.

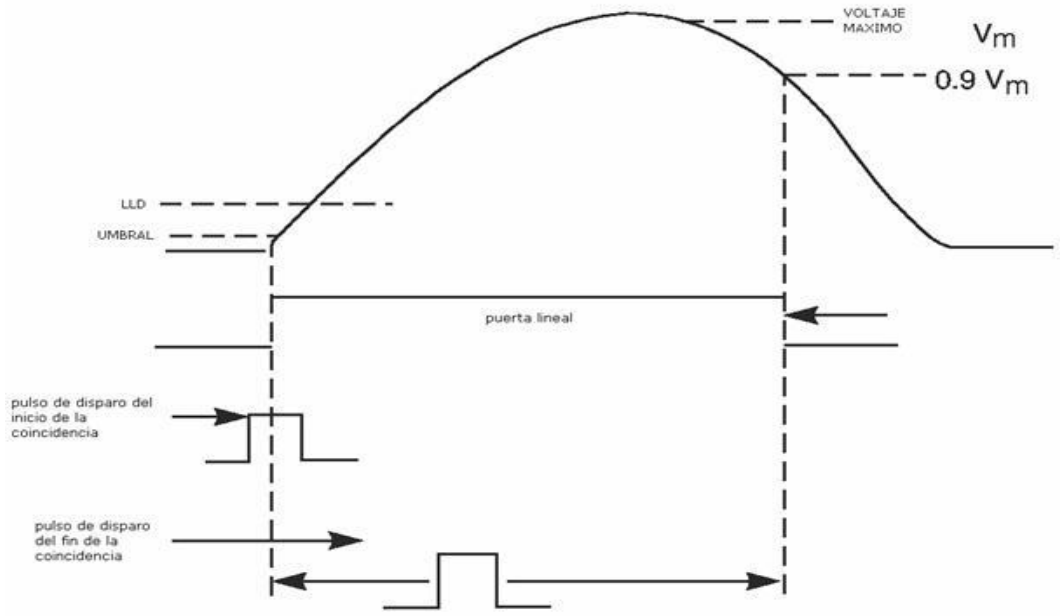


Figura 60. Tiempo de disparo de coincidencia y pulso de entrada.

Las señales que varían lentamente o los niveles de corriente continua pueden mostrarse y digitalizarse para obtener una curva de distribución de la amplitud. Cuando se ajusta un convertidor analógico digital en modo análisis de la muestra de voltaje, una señal muestreada en la entrada de disparo determina cuándo será digitalizada la señal.

[13] Discriminadores de nivel superior e inferior.

Los discriminadores de nivel superior e inferior, ajustan una ventana de energía de tal forma que permite el rechazo de la señales de entradas al proceso de conversión si su amplitud está fuera del rango de la ventana seleccionada.

[14] Nivel cero del convertidor analógico digital.

El nivel cero o línea base analógica, se ajusta sobre un rango pequeño para permitir ajustes precisos de la energía cero.

4.7. Contenedores de la muestra para la irradiación.

Las muestras a irradiar para el análisis de activación deben ser contenidas de alguna manera en un recipiente. El material del

contenedor por sí mismo no debe convertirse en radiactivo, puesto que crearía riesgos para los manipuladores. Generalmente se utiliza polietileno en las irradiaciones con neutrones termales pues el polietileno de alta calidad contiene muy pocas impurezas que se activen significativamente ante los neutrones termales.

Además, se encuentran fácilmente suministradores de este producto, aunque no siempre tienen las dimensiones correctas para un trabajo particular. En este caso es bastante sencillo conseguir recipientes de polietileno de baja densidad moldeada por inyección y diseñadas para un propósito específico.

El polietileno puede ser también sellado fácilmente por calor usando un soldador convencional lo cual hace fácil la preparación de las muestras. Si fuera necesario también sería posible mecanizar el polietileno para producir tapas con rosca. A causa de que el polietileno es relativamente puro es a menudo posible hacer el contaje de la cápsula activada en su contenido sin tener que hacer transferencia de muestra a un nuevo contenedor. Esto será una gran ventaja ya que permite, por ejemplo manejar polvos radiactivos.

El principal inconveniente del polietileno es el daño que la irradiación produce cuando se sitúa en un flujo de neutrones alto. El polímero se deteriora hasta convertirse en un material frágil el cual se decolora, y en casos extremos se romperá y se desintegrará.

En el caso de tener irradiaciones prolongadas, a veces se usan recipientes de aluminio con tapas atornilladas en vez de polietileno. El aluminio se activa para dar ^{28}Al, con una vida media de 2,3 minutos, lo cual puede suponer un riesgo de radiación en irradiaciones cortas, pero no después de un periodo de decaimiento relativamente corto.

La irradiación de líquidos puede presentar un problema y es importante sellar bien las cápsulas de irradiación. Sin embargo no hay ninguna razón por la cual los líquidos no puedan irradiarse, siempre que se preste atención a la posible evolución de gases debido a la radiolisis. Este efecto puede limitar la cantidad de líquido o el tiempo de irradiación. La temperatura en el lugar de irradiación puede tener un gran impacto en la muestra líquida y, la temperatura alcanzada dependerá del tipo de reactor. Las ampollas de vidrio de cuarzo se usan normalmente para irradiar líquidos cuando éstos van a experimentar posteriormente radioquímica para facilitar la transferencia completa de la muestra. La pureza del vidrio entonces es muy importante y será analizado junto con la muestra.

El contenedor de la muestra probablemente estará en contacto con residuos radiactivos después de su uso. Por eso en algunos casos se empaqueta la muestra en una cápsula interior al contenedor, de tal manera que el contenedor no quede contaminado con el residuo.

En determinadas circunstancias, se utiliza un doble contenedor que es favorable desde el punto de vista de la seguridad en caso de rotura del contenedor interior.

La forma y el tamaño de los contenedores de irradiación dependerá del emplazamiento de la irradiación. Los tubos de irradiación suelen ser cilíndricos y el diámetro interior del tubo de irradiación determinará el diámetro exterior del contenedor de irradiación. Cuando se usa un sistema de transferencia neumático, donde el contenedor de

la muestra se lanza bajo presión a lo largo de un tubo, la forma del contenedor es un aspecto crítico, así como el tamaño.

Los sistemas neumáticos son más sensibles a la forma de la cápsula, porque el diámetro del contenedor debe ser próximo al hueco interior del tubo neumático, de manera que el gas no se escape alrededor del espacio anular.

Sin embargo, la cápsula debe ser capaz de viajar a través de recodos en el sistema. Las formas de los contenedores diseñados para solucionar estos problemas pueden ser bastante diferentes, algunos tienen un perfil reducido en los extremos, mientras otros tienen un anillo en los extremos.

5. Estudio teórico de las reacciones nucleares en una muestra de fluorita.

En este capítulo, se estudian las reacciones nucleares que tienen lugar entre los elementos de una muestra de fluorita y los neutrones. Se consideran dos aspectos complementarios:

[1] por una parte, todos los aspectos referentes a las muestras de fluorita, cuyo objetivo último es obtener una lista de elementos base para el siguiente estudio. El proceso de estudio relativo a la composición elemental de la muestra de fluorita es el siguiente:

- En un primer punto se analizan las posibles fuentes de la muestra con objeto de evaluar su composición elemental aproximada así como su rango de variación.
- Se indican los minerales que se prevé encontrar en las muestras de fluorita, según su procedencia.
- Se da un valor característico de la concentración de los distintos compuestos en la muestra de fluorita. Para la determinación de este valor se establece la siguiente clasificación:
  - Para el mineral en bruto, la concentración depende del tipo de yacimiento.
  - Para las muestras procedentes de la planta de concentración se considera el punto de extracción de la muestra en la planta de concentración de la fluorita.
- Solo se tienen en consideración aquellos compuestos cuya concentración sea superior a una cantidad dada o, sin serlo, tengan interés en la comercialización del producto, según se indica en el apartado de especificaciones del producto final.

[2] y por otra, el examen profundo de las reacciones que tienen lugar entre los neutrones y los elementos que se han obtenido del punto anterior. El proceso de estudio relativo a estas reacciones es el siguiente:

- Para cada uno de los elementos descritos en el apartado anterior, se examinan los isótopos posibles y la abundancia isotópica relativa de cada uno de ellos.
- Se consultan todos los resultados bibliográficos de todas las reacciones que, cada uno de los isótopos naturales de cada elemento, tenga con los neutrones de todo tipo de energías. Para ello se utilizarán bases de datos consultables a través de Internet.
- Para cada una de estas reacciones se buscan los parámetros nucleares: las secciones eficaces en función de la energía de los neutrones incidentes, energía γ de captura de neutrones, etc.
- Si alguna de estas reacciones produce isótopos inestables, se analiza el decaimiento de los mismos: vida media, modo de decaimiento, energías γ, etc.

- Se extraen conclusiones parciales para cada elemento.
- Se extraen conclusiones globales para todos los elementos involucrados.

Las bases de datos consultadas son las siguientes:

[1] Experimental Nuclear Reaction Data (**EXFOR / CSISRS**). La biblioteca de EXFOR contiene una amplia recopilación de datos de reacciones nucleares experimentales. Las reacciones con los neutrones se han compilado sistemáticamente desde el descubrimiento del neutrón si bien, las reacciones con las partículas cargadas y con los fotones se han cubierto desde hace menos tiempo. La biblioteca contiene datos de más de 15500 experimentos.

[2] Computer Index of Nuclear (reaction) Data (CINDA) contiene referencias bibliográficas de medidas, cálculos, revisiones y evaluaciones de secciones eficaces de los neutrones y otros datos microscópicos de los neutrones, e incluye, también, referencias indexadas a bibliotecas de ordenadores de datos numéricos de neutrones disponibles en cuatro centros de datos de neutrones. Contiene referencias de 275000 reacciones a partir de 55000 trabajos.

[3] Nuclear Science References (NSR) Bibliographical contiene información de física nuclear de unos 180,000 artículos, indexados de acuerdo al contenido. Se extiende a casi 100 años de investigación, y actualmente abarca 80 revistas con casi 4200 nuevos artículos añadidos cada año.

[4] Nuclear Structure & Decay data (NuDat) permite buscar y dibujar la estructura nuclear y los datos de decaimiento de manera interactiva. Permite conocer propiedades de

a. niveles tales como energía, vida media, paridad spin,
b. información de rayos gamma, tal como energía, intensidad, o
c. información sobre la radiación siguiente a un decaimiento nuclear así como la energía de la radiación, la intensidad, la dosis.

Estas bases de datos se encuentran en la página web http://www.nndc.bnl.gov/ que tiene la siguiente presentación:

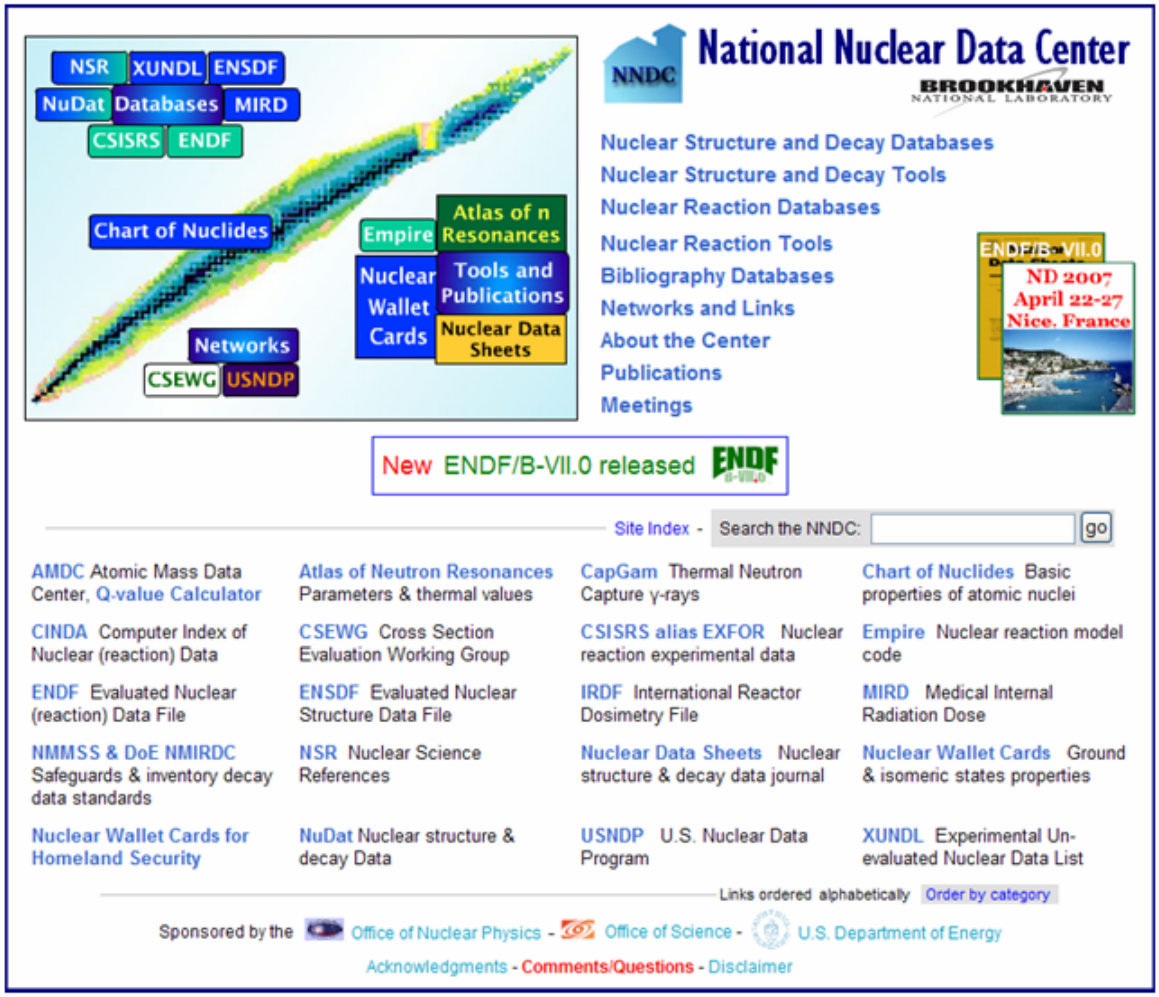


Figura 61. Página principal de la National Nuclear Data Center.

Para conocer las probabilidades de que se produzca una reacción dada de un determinado isótopo con los neutrones, se conecta con la base EXFOR y se obtiene la siguiente pantalla en la que se introducen los datos del isótopo y del tipo de reacción.

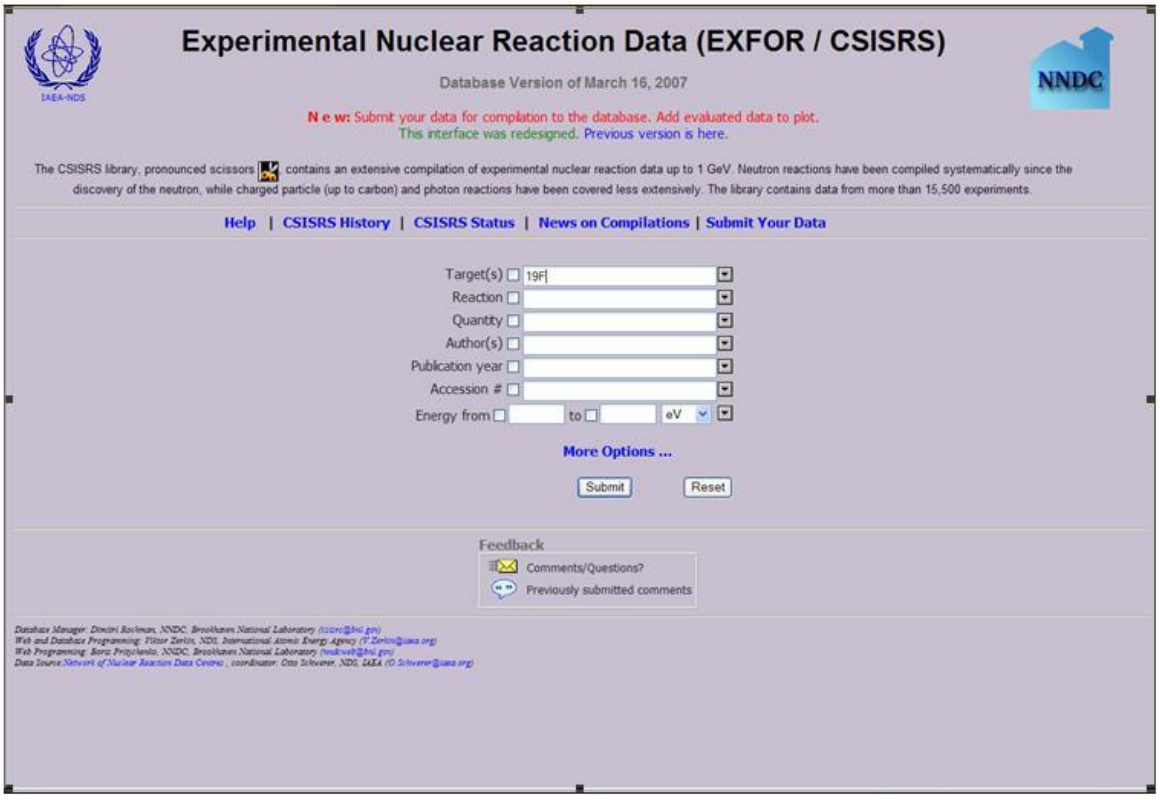


Figura 62. Búsqueda de las reacciones con el 19F.

En la Figura 62 se ha introducido un campo de la búsqueda que es el 19F. A continuación se buscan los datos de cada una de las reacciones que se producen de todos los tipos siguientes que hay en la base de datos, y que son los que se han explicado en el capítulo 3.4.1:

	(n,2n)	(n,3n)				
(n,α)	(n,α+2n)	(n,α+n)	(n,α+X)			
(n,abs)	(n,D)	(n,EL)	(n,F)			
(n,g)	(n,g+n)	(n,g+p)	(n,g+X)			
	(n,INL)	(n,INL+F)				
(n,n)	(n,n+α)	(n,n+D)	(n,n+G)	(n,n+p)	(n,n+T)	(n,n+X)
(n,non)	(n,p)	(n,p+α)	(n,p+D)	(n,p+n)	(n,p+T)	(n,p+X)
(n,SCT)	(n,T)	(n,T+α)	(n,T+n)	(n,T+p)		
(n,THS)	(n,TOT)					

Figura 63. Tipos de reacciones con neutrones.

Se ha utilizado los siguientes códigos:

- α.- partículas alfa.
- abs:-absorción
- D.- Deuterio
- EL:- dispersión elástica.
- F: Fisión
- g.- Rayos gamma
- INL.- Dispersión inelástica.
- non.- No elástica (Total menos elástica)
- p.- Protones
- SCT.- Dispersión total (elástica + inelástica).

- T.- Tritio.
- THS.- dispersión de neutrones termales.
- TOT.- Total.
- X.- No especificado.
- Xn.- número variable de neutrones emitidos.
- Yp.- número variable de protones emitidos.

Introduciendo cada uno de estos tipos de reacciones en el campo "Reacción" de la figura anterior se obtiene un listado de referencias en esta base de datos EXFOR:

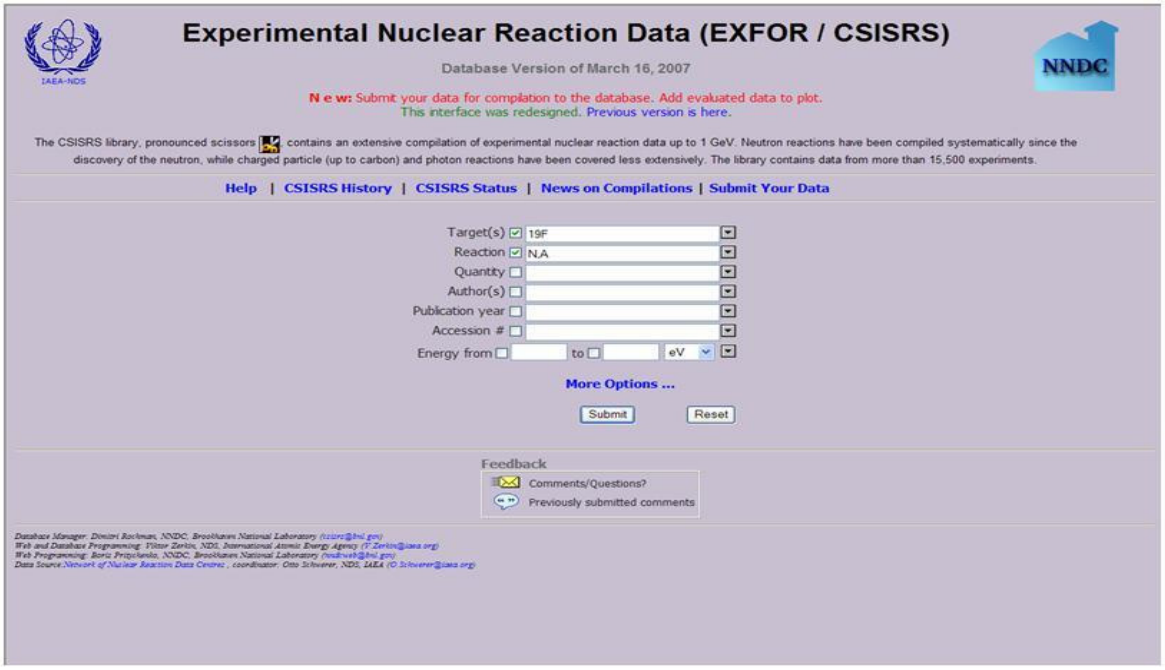
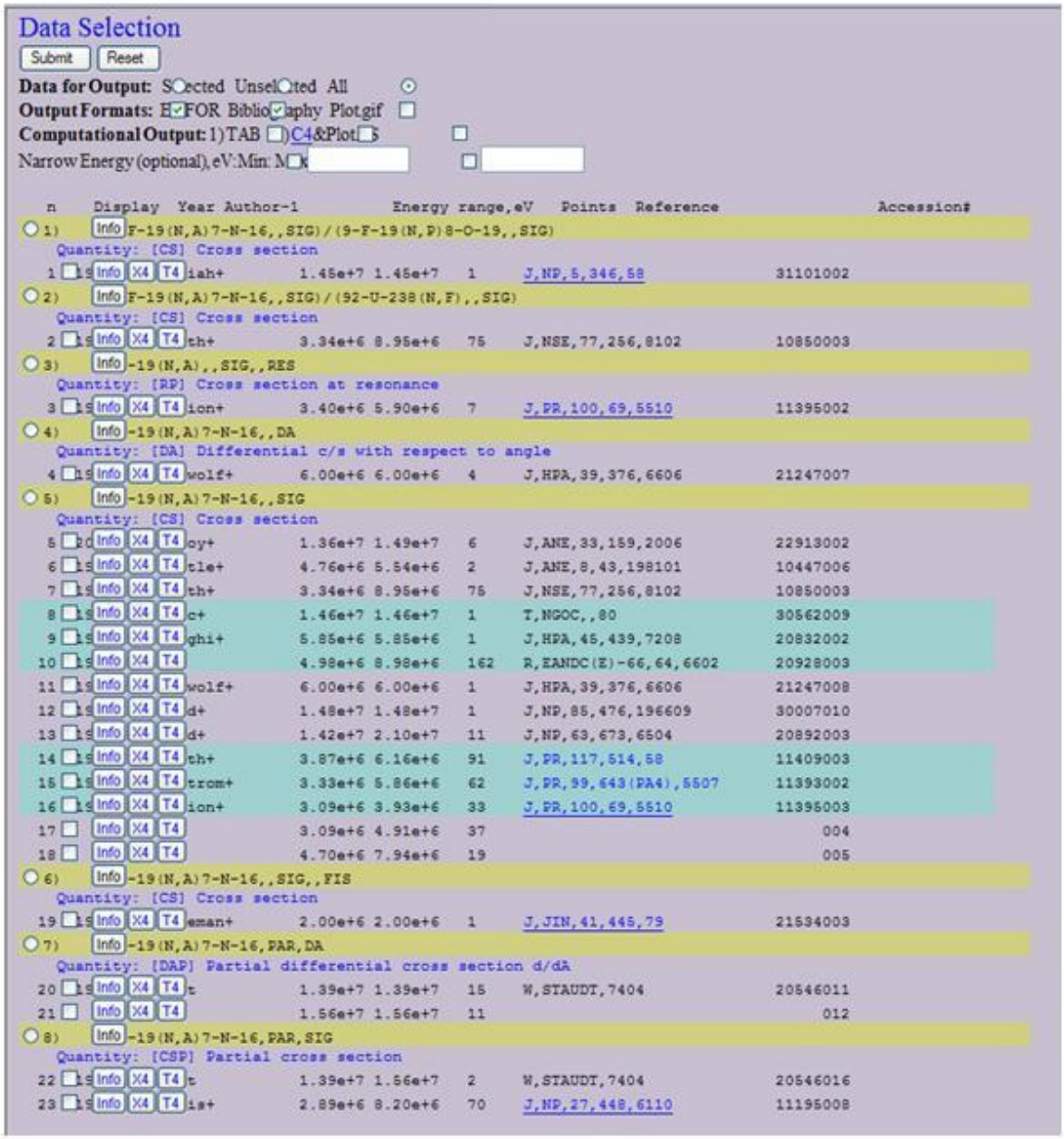


Figura 64. Búsqueda de las reacciones del 19F con los neutrones que produzcan radiación α.



Data Selection

Submit Reset

Data for Output: S○ected Unsel○ted All ⊙

Output Formats: H☑FOR Biblio☑aphy Plot.gif ☐

Computational Output: 1)TAB ☐)C4&Plot☐5 ☐

Narrow Energy (optional), eV: Min: M☐k ☐

n	Display	Year	Author-1	Energy range, eV		Points	Reference	Accession#
○ 1)	Info	F-19(N,A)7-N-16,,SIG)/(9-F-19(N,P)8-O-19,,SIG)						
	Quantity: [CS] Cross section							
1	☐19 Info X4 T4	iah+		1.45e+7	1.45e+7	1	J,NP,5,346,58	31101002
○ 2)	Info	F-19(N,A)7-N-16,,SIG)/(92-U-238(N,F),,SIG)						
	Quantity: [CS] Cross section							
2	☐19 Info X4 T4	th+		3.34e+6	8.95e+6	75	J,NSE,77,256,8102	10850003
○ 3)	Info	-19(N,A),,SIG,,RES						
	Quantity: [RP] Cross section at resonance							
3	☐19 Info X4 T4	ion+		3.40e+6	5.90e+6	7	J,PR,100,69,5510	11395002
○ 4)	Info	-19(N,A)7-N-16,,DA						
	Quantity: [DA] Differential c/s with respect to angle							
4	☐19 Info X4 T4	wolf+		6.00e+6	6.00e+6	4	J,HPA,39,376,6606	21247007
○ 5)	Info	-19(N,A)7-N-16,,SIG						
	Quantity: [CS] Cross section							
5	☐20 Info X4 T4	oy+		1.36e+7	1.49e+7	6	J,ANE,33,159,2006	22913002
6	☐19 Info X4 T4	tle+		4.76e+6	5.54e+6	2	J,ANE,8,43,198101	10447006
7	☐19 Info X4 T4	th+		3.34e+6	8.95e+6	75	J,NSE,77,256,8102	10850003
8	☐19 Info X4 T4	c+		1.46e+7	1.46e+7	1	T,NGOC,,80	30562009
9	☐19 Info X4 T4	ghi+		5.85e+6	5.85e+6	1	J,HPA,45,439,7208	20832002
10	☐19 Info X4 T4			4.98e+6	8.98e+6	162	R,EANDC(E)-66,64,6602	20928003
11	☐19 Info X4 T4	wolf+		6.00e+6	6.00e+6	1	J,HPA,39,376,6606	21247008
12	☐19 Info X4 T4	d+		1.48e+7	1.48e+7	1	J,NP,85,476,196609	30007010
13	☐19 Info X4 T4	d+		1.42e+7	2.10e+7	11	J,NP,63,673,6504	20892003
14	☐19 Info X4 T4	th+		3.87e+6	6.16e+6	91	J,PR,117,514,58	11409003
15	☐19 Info X4 T4	trom+		3.33e+6	5.86e+6	62	J,PR,99,643(PA4),5507	11393002
16	☐19 Info X4 T4	ion+		3.09e+6	3.93e+6	33	J,PR,100,69,5510	11395003
17	☐ Info X4 T4			3.09e+6	4.91e+6	37		004
18	☐ Info X4 T4			4.70e+6	7.94e+6	19		005
○ 6)	Info	-19(N,A)7-N-16,,SIG,,FIS						
	Quantity: [CS] Cross section							
19	☐19 Info X4 T4	eman+		2.00e+6	2.00e+6	1	J,JIN,41,445,79	21594003
○ 7)	Info	-19(N,A)7-N-16,PAR,DA						
	Quantity: [DAP] Partial differential cross section d/dA							
20	☐19 Info X4 T4	t		1.39e+7	1.39e+7	15	W,STAUDT,7404	20546011
21	☐ Info X4 T4			1.56e+7	1.56e+7	11		012
○ 8)	Info	-19(N,A)7-N-16,PAR,SIG						
	Quantity: [CSP] Partial cross section							
22	☐19 Info X4 T4	t		1.39e+7	1.56e+7	2	W,STAUDT,7404	20546016
23	☐19 Info X4 T4	is+		2.89e+6	8.20e+6	70	J,NP,27,448,6110	11195008

Figura 65. Listado de referencias de las reacciones de tipo 19F(n,α).

Para buscar las secciones eficaces en forma de gráfica a partir de los datos de dichas referencias, se debe solicitar dicha información marcando la opción Plot.gif en el cuadro anterior.

Figura 66. Solicitud de la gráfica de las secciones eficaces para la reacción 19F(n,α).

La respuesta de dicha solicitud es la siguiente:

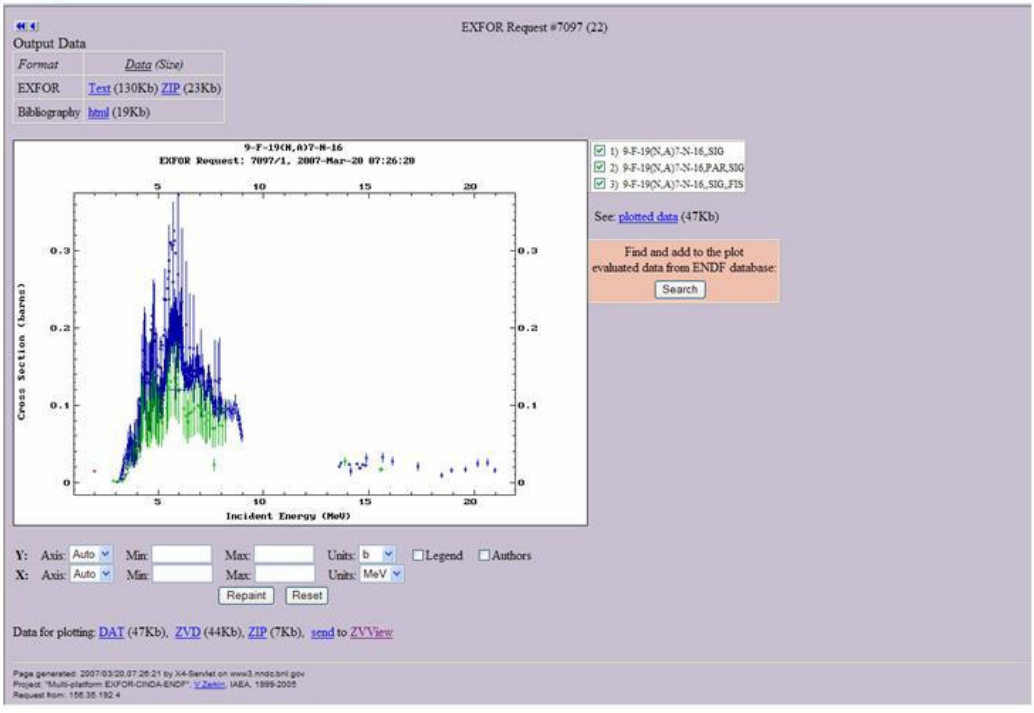


Figura 67. Respuesta a la solicitud hecha a la base de datos EXFOR de las secciones eficaces de la reacción 19F(n.α).

Para poder representar los ejes en la escala adecuada y poner un indicador del autor de la referencia así como del año de la publicación, se ha optado por utilizar una aplicación de esta base de datos como es el programa ZVView. La pantalla de dicha aplicación para las secciones eficaces de la reacción 19F(n,α) es la siguiente:

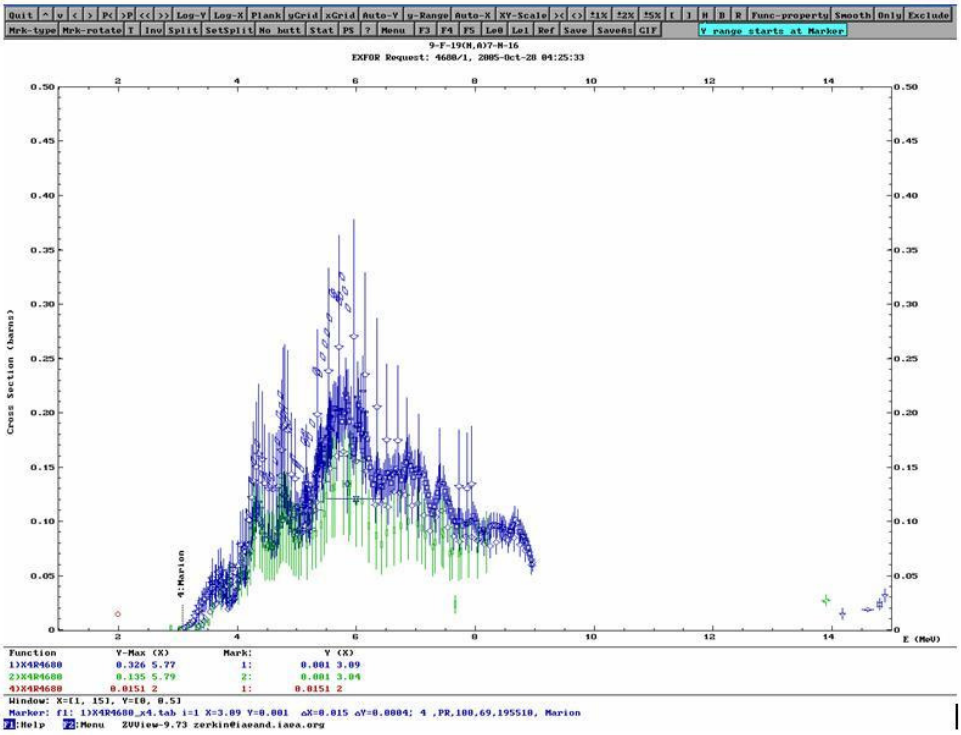


Figura 68. Pantalla de la aplicación ZVView para la reacción 19F(n,α).

De esta manera se han obtenido todas las secciones eficaces de las reacciones que se muestran en este capítulo.

Para conocer el modo de decaimiento del producto de estas reacciones se ha consultado la base NuDat, que se encuentra en la misma página principal de la Figura 61. En la página principal de esta base de datos se introduce el elemento del que se quiera saber su decaimiento, por ejemplo el 16N, (Figura 69.). Como resultado de la consulta se obtiene la Figura 70.

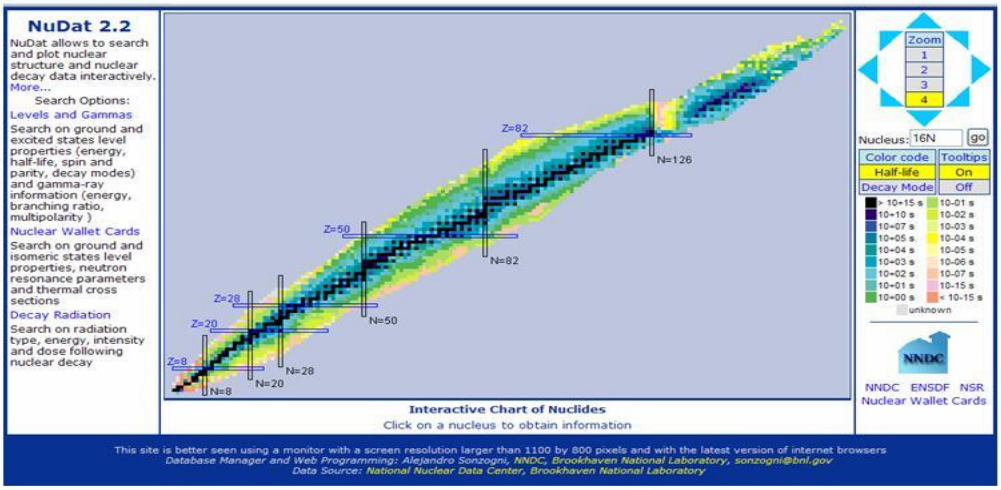


Figura 69. Página principal de la base de datos NuDat.

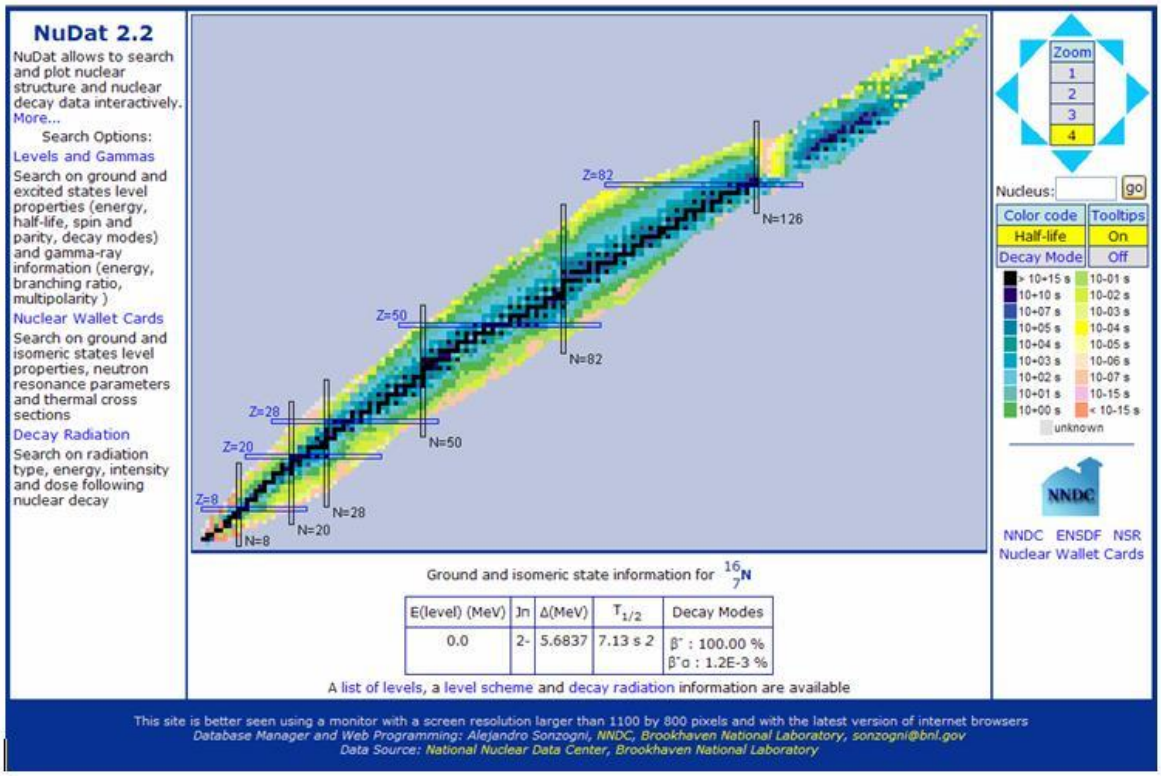
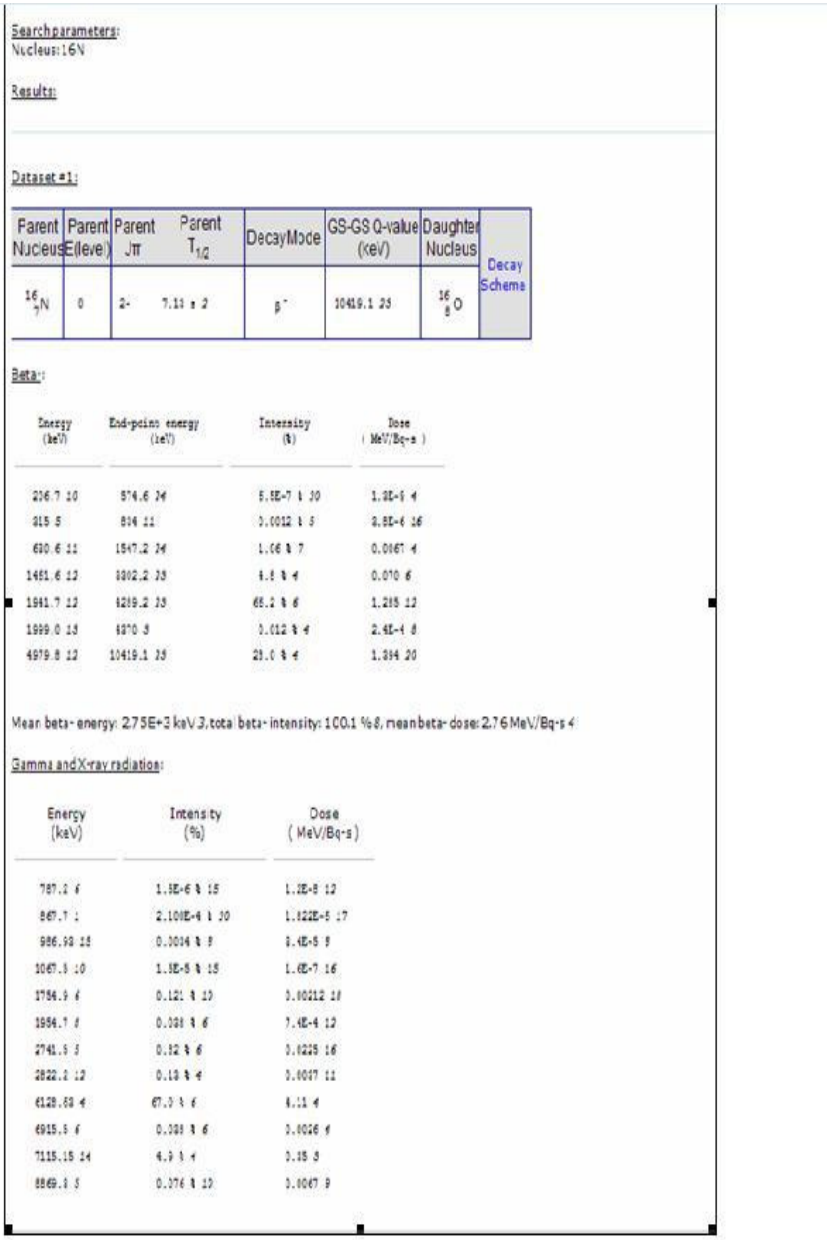


Figura 70. Resultado de la búsqueda para el 16N en la base NuDat.

Finalmente, haciendo clik en "decay radiation" se obtiene la información buscada acerca de las características de decaimiento del 16N, tal como se aprecia en la Figura 71.



Search parameters:
Nucleus: 16N

Results:

Dataset #1:

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent Jπ	Parent $T_{1/2}$	DecayMode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Schema
$^{16}_{7}N$	0	2-	7.13 s 2	β^-	10419.1 25	$^{16}_{8}O$	

Beta-:

Energy (keV)	End-point energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
206.7 10	574.6 24	5.5E-7 % 30	1.3E-6 4
315 5	814 11	3.0012 % 5	2.8E-6 16
630.6 11	1547.2 24	1.06 % 7	0.0067 4
1451.6 12	1802.2 23	4.5 % 4	0.070 6
1941.7 12	4219.2 23	65.2 % 6	1.215 12
1999.0 13	4870 3	3.012 % 4	2.4E-4 8
4979.8 12	10419.1 25	23.0 % 4	1.394 20

Mean beta- energy: 2.75E+3 keV 3, total beta- intensity: 100.1 % 8, mean beta- dose: 2.76 MeV/Bq-s 4

Gamma and X-ray radiation:

Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
787.2 6	1.5E-6 % 15	1.2E-8 12
847.7 1	2.101E-6 % 30	1.822E-5 17
986.93 15	0.0014 % 3	1.4E-5 3
1067.3 10	1.3E-5 % 15	1.4E-7 16
1756.9 6	0.121 % 13	0.0212 23
1956.7 3	0.031 % 6	7.4E-4 13
2741.5 3	0.12 % 6	0.0225 16
2922.2 12	0.13 % 4	0.0027 11
6128.63 4	67.0 % 6	6.11 4
6915.5 6	0.038 % 6	0.0026 4
7115.15 14	4.9 % 4	0.35 3
8869.1 5	0.376 % 12	0.0047 2

Figura 71. Resultado de la búsqueda en la base de datos NuDat de las características de decaimiento del 16N.

5.1. Composición elemental de una muestra de fluorita.

La composición elemental depende de cual sea la procedencia de la muestra.

5.1.1. Procedencia de la muestra a analizar.

Las muestras pueden proceder de:

- Mina.

- Este será el producto más heterogéneo.

- Distintos puntos de control de un lavadero.
  - Estará caracterizado porque en un punto concreto de una planta de concentrado las leyes varían en un estrecho margen.
  - La finalidad de la medida en esta situación será conocer la posible desviación de la concentración con objeto de tomar medidas correctoras.
- De un producto comercial de compuestos de flúor.
- De un estéril de mina o de planta.

5.1.2. Muestra procedente de una mina.

En términos generales, el mineral que procede de una misma mina tiene una ley que varia en un estrecho margen, si bien las leyes varían notablemente de unas explotaciones a otras.

En la Tabla 40, se muestran las leyes medias que tienen los minerales de distintas procedencias. Estas leyes serán las características de la mina, de los sondeos, o del material en bruto que se puede adquirir directamente a otras minas, para procesar en el lavadero.

Procedencia		Fluorita %mín.	Calcita %	Silice/silicatos %	Otros %
Asturias	Villabona	33-36	28-30	30-32	>10
	Moscona	30-32	8-12	>60	
	La Collada. Siero	31-37	20-22	>40	
	Caravia	30-33	<5	>65	
	Almería	21-37	>60		
	Sudáfrica	38-43	<5	<5	50 óxidos Fe

Tabla 40. Leyes medias de los minerales de fluorita.

Minoritariamente, en algunas zonas, se encuentran apreciables cantidades de barita, de óxidos de Fe, (que pueden llegar a haber, en muestras, del 15%), y de otros silicatos.

5.1.3. Muestra procedente de distintos puntos del lavadero.

De una forma muy simplificada, en la Figura 72, se expone un diagrama de una planta de concentración de fluorita.

El mineral procede de las minas y se almacena de forma clasificada en pilas. Después pasa a trituración de donde sale con un tamaño menor de 15 mm y se almacena en un silo.

El siguiente punto del proceso es la molienda en molinos de bolas en donde se le añade agua. En esta fase se eliminan los mixtos.

A continuación pasa al espesador y parte del agua vuelve al molino. La pulpa que entra en el espesador tiene 98% de F_2Ca en los tamaños menores de 100 µm y un 60% de fluorita en tamaños menores de 40µm.

El primer punto de control de la fluorita PC1 se hace a la salida del espesador, y en este punto, la concentración de fluorita es del orden de 32%.

La pulpa pasa al acondicionador donde se le añaden los reactivos necesarios para la flotación de la fluorita y vapor.

Una vez acondicionada la pulpa, ésta pasa al desbaste. En este proceso se obtiene una pulpa con un 80% en fluorita, con un punto de control de la muestra PC2, y un estéril de desbaste con una ley en torno al 3-5%, del que se tomará una tercera muestra en el punto de control PC3.

El último proceso de la pulpa es el de relavado, del que, finalmente, se obtiene el concentrado que se denomina comercialmente como "ácido", con un valor de F_2Ca aproximado de 97%. De este flujo, se toma una muestra para analizar, en el PC4.

El rechazo es de dos tipos, uno del 70% de F_2Ca que vuelve de nuevo al proceso, en la entrada del espesado, y del que se toma una muestra en el punto PC6.

Otro producto es el estéril del relavado que se controla en el punto PC5 y que tiene una ley media de 25-35%. Este producto es muy poca cantidad, y se junta con el estéril de desbaste para llevarlo a la zona de estéril.

Un esquema gráfico se muestra en la siguiente figura:

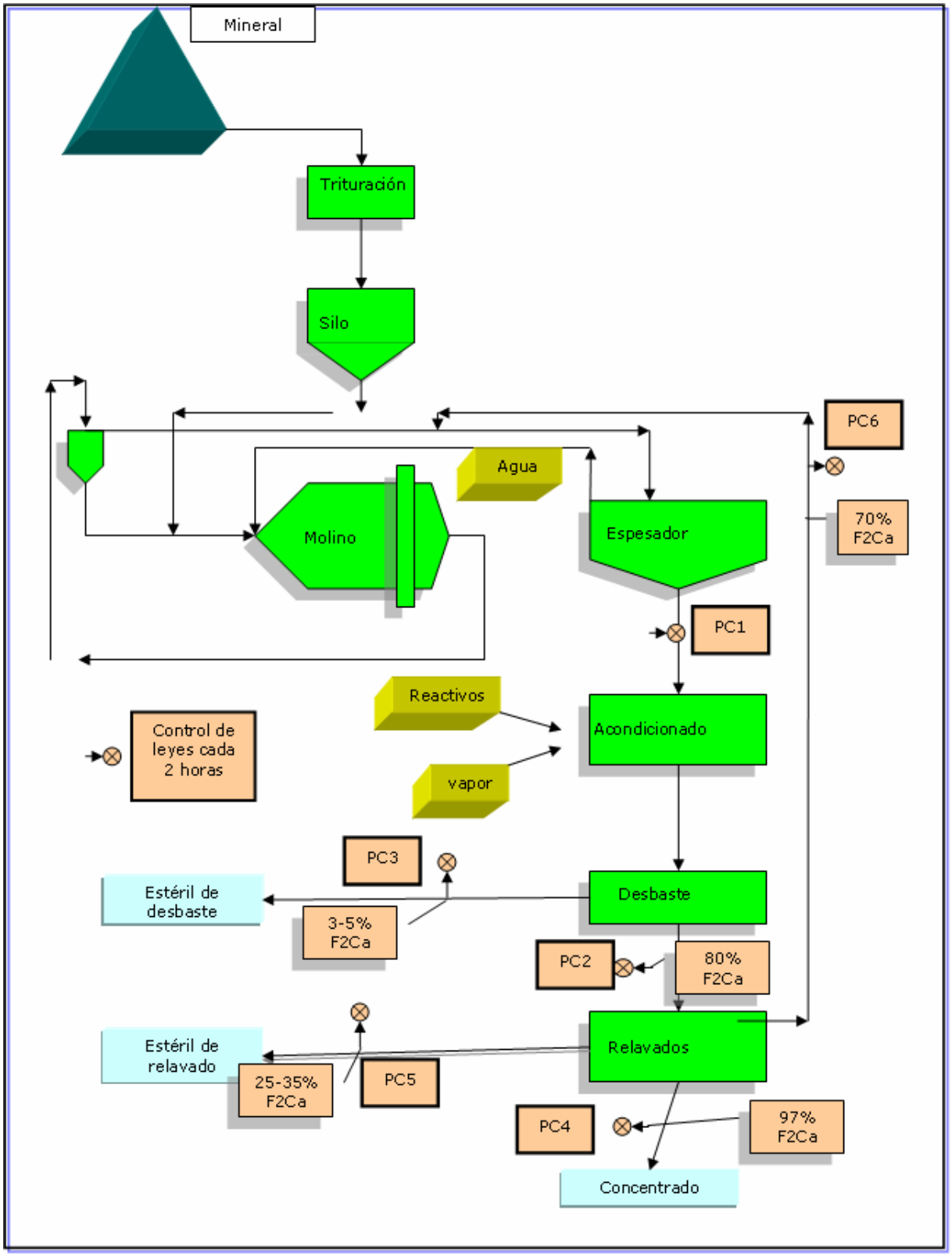


Figura 72. Diagrama de una planta de concentración de fluorita.

5.1.4. Especificaciones del producto final.

Existen unas especificaciones generales, y unas especificaciones particulares según la aplicación que vaya a tener el producto respecto a las concentraciones y respecto a las granulometrías o a la humedad: Se destacan aquí, las especificaciones respecto a los elementos, porque son las que más interesan desde el punto de vista del estudio.

a. Especificaciones generales:

El producto final debe cumplir, en general, las siguientes especificaciones:

- Tener como mínimo, un 97% de fluorita,
- Y un máximo de SiO_2 de 1%
- Un máximo de CO_3Ca de 1%
- Un máximo de Fe_2O_3 de 1%
- Y un máximo de SO_4Ba de 1%

En los yacimientos asturianos, se puede asegurar que si la cantidad de sílice está por debajo del 1%, se cumplen las otras especificaciones, ya que no es muy normal que los carbonatos, sulfatos y óxidos de hierro superen el 1%. De esta forma, se garantiza que la ley de la fluorita cumple la especificación de estar por encima del 97%. El control en la planta se basa, fundamentalmente en la medida de la fluorita y de la sílice.

Los yacimientos de África tienen problemas para cumplir la especificación respecto a los óxidos de Fe y controlan, en el proceso la presencia de estos óxidos, con más frecuencia que en las plantas asturianas de concentración. Sin embargo, en estas plantas, es menos significativo el control de la ley de sílice en el proceso.

b. Especificaciones particulares:

Si el cliente utiliza el "ácido" para fabricar freón, pondrá límites a la concentración de As.

Si el cliente lo usa en la industria del aluminio, penalizará la presencia de fósforo. En algunos países, limitarán la cantidad de mercurio, etc.

Estas cantidades se pueden encontrar presentes en un orden de ppm. Por ejemplo, el producto final puede tener un 3ppm de As, unos 250ppm de P o 1ppm de mercurio.

5.1.5. Resumen de los elementos de interés.

A la vista de la información anterior, los elementos que pueden aparecer en el análisis de la muestra procedente de la mina son:

La composición elemental de la muestra:

- F que procede de la fluorita
- Ca que procede de los carbonatos y de la fluorita
- Si que procede de la sílice y de los silicatos

- S de los sulfuros
- Ba
- Fe de los óxidos presentes
- P
- Mg
- As
- Hg
- O que se encuentra en los carbonatos, la sílice o el agua
- H del agua

A continuación se muestra un estudio de las reacciones de los neutrones con cada uno de estos elementos, con objeto de analizar la viabilidad teórica de la detección de la fluorita, y la posible interferencia con otros elementos presentes en la matriz.

5.2. Estudio del flúor.

El flúor se encuentra en la naturaleza en la forma 9-F-19 tal y como se desprende de la siguiente tabla (Tabla 41).

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{18}F	0	18	1	1,830h	β^+,EC
^{19}F	100	18,9984	1/2	--	estable

Tabla 41. Isótopos del flúor.

Se van a exponen a continuación todas las reacciones del flúor 19F que se han encontrado en la bibliografía científica de las bases de datos mencionadas en la página 118. Para cada reacción se adjunta el gráfico de las distintas versiones de valores, según los autores, de las secciones eficaces, expresados en barn, según la energía del neutrón incidente, en MeV. Los autores, así como el año de la publicación aparecen en la misma gráfica y responden a la bibliografía general de la que solo se relaciona en el apartado correspondiente aquellas referencias que pueden ser consultadas en las bases de datos.

[1] 9-F-19(n,2n)9-F-18. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

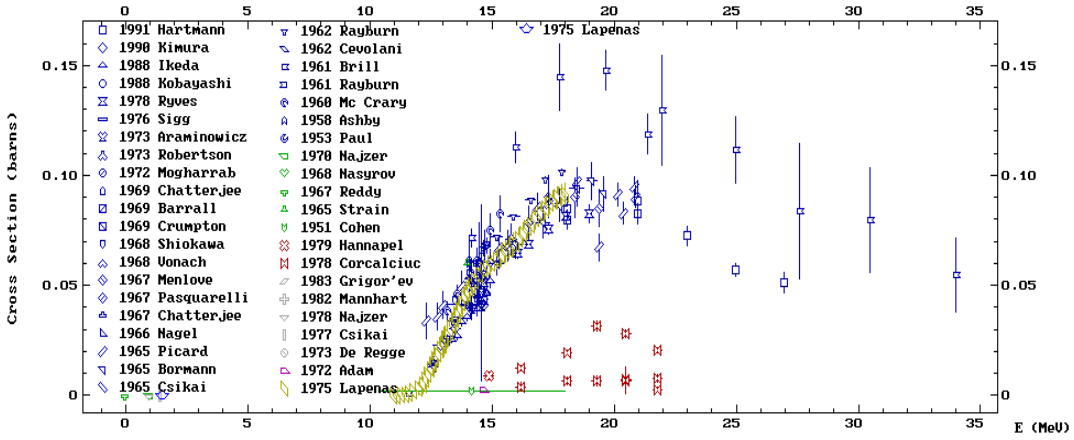


Figura 73. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,2n)9-F-18.

[2] 9-F-19(n,α)7-N-16. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

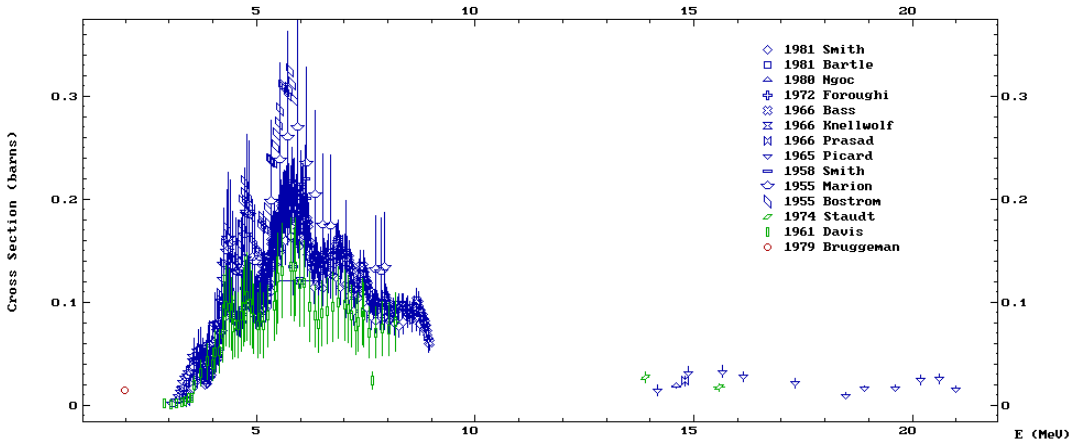


Figura 74. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16.

[3] 9-F-19(n,D)8-O-18. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

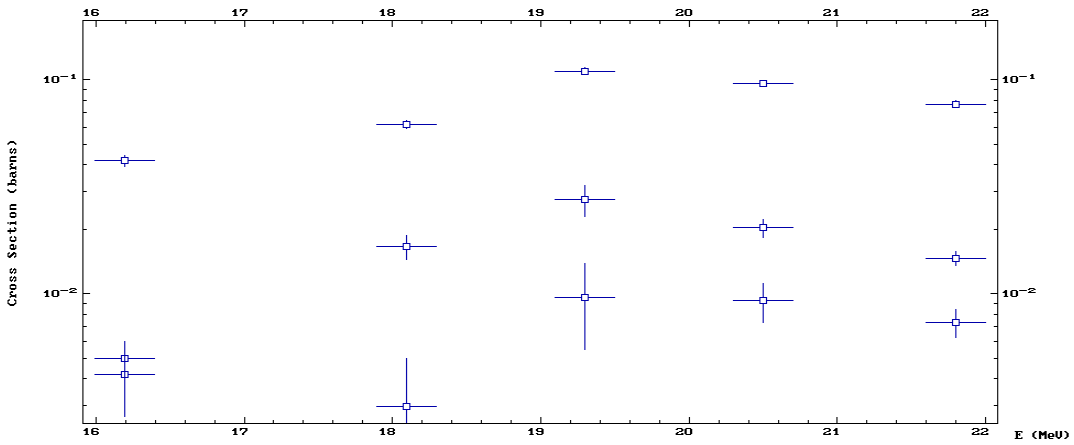


Figura 75. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,D)8-O-18.

[4] 9-F-19(n,EL)9-F-19. Con las siguientes secciones eficaces.

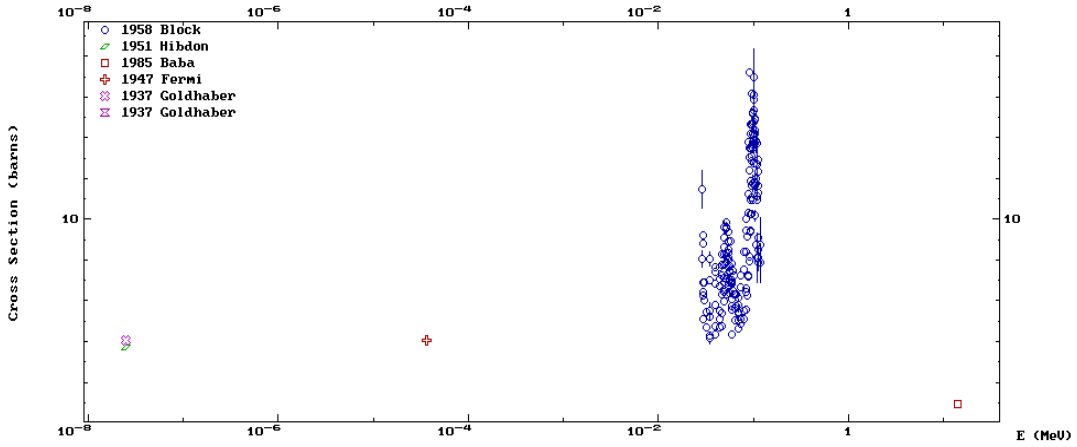


Figura 76. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,EL)9-F-19.

[5] 9-F-19(n,g)9-F-20. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces.

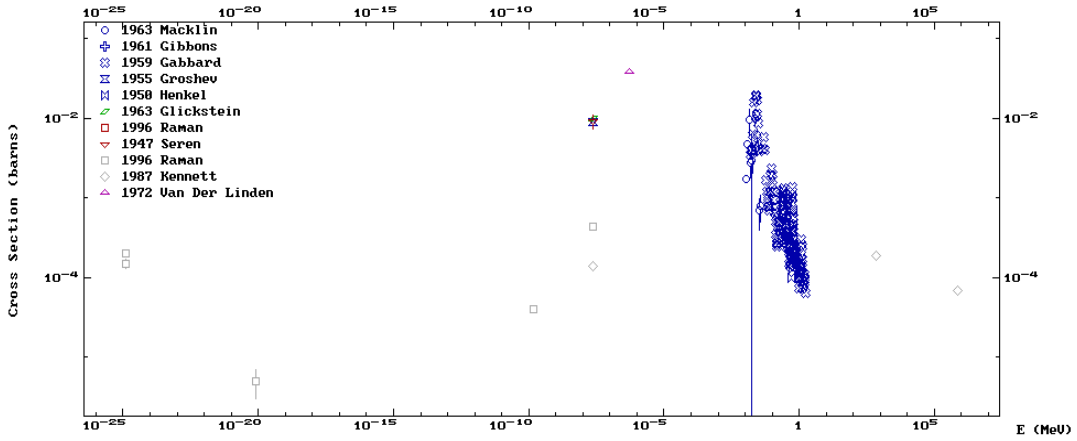


Figura 77. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,g)9-F-20.

[6] 9-F-19(n,INL)9-F-19. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

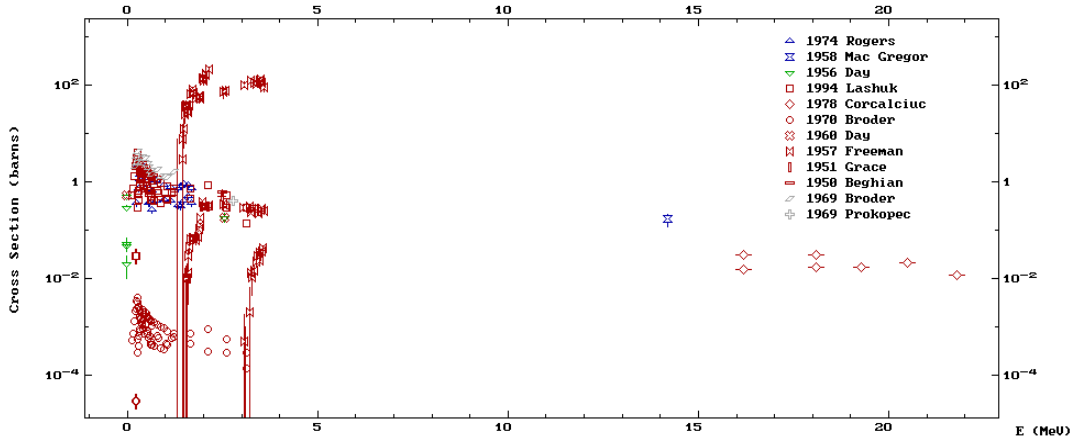


Figura 78. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,INL)9-F-19.

[7] 9-F-19(n,non). La sección eficaz es:

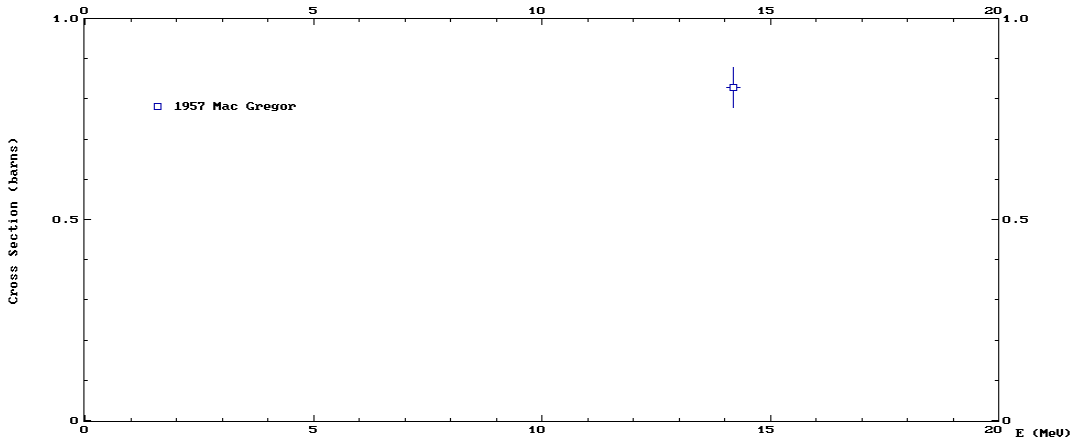


Figura 79. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(N,NON).

[8] 9-F-19(n,p)8-O-19. La sección eficaz correspondiente es:

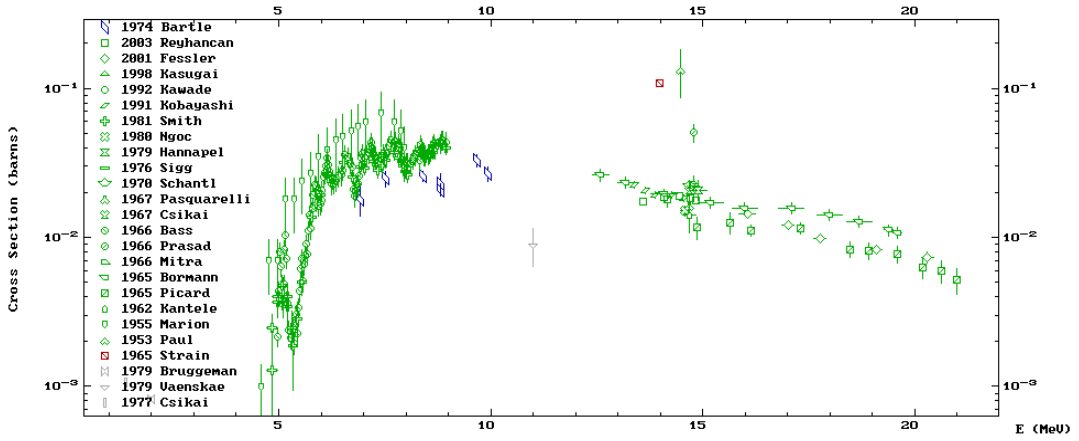


Figura 80. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,p)8-O-19.

[9] 9-F-19(n,SCT)9-F-19. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

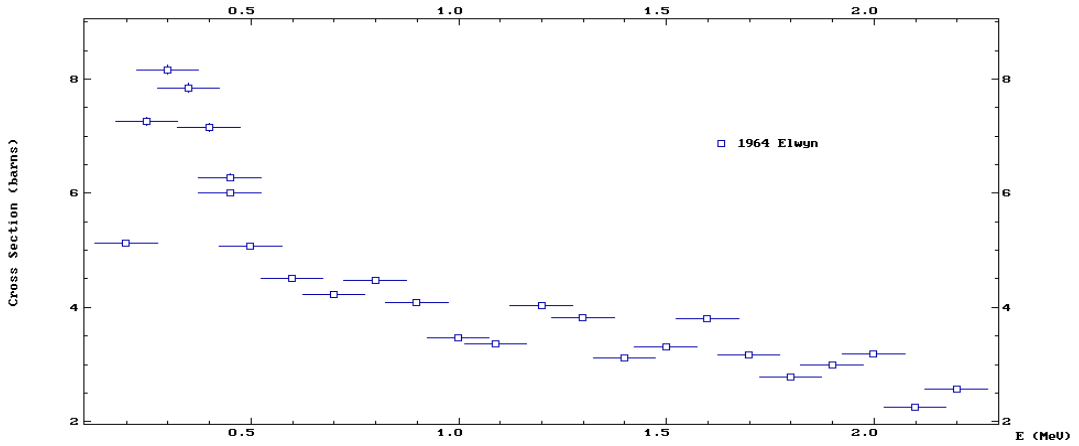


Figura 81. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,SCT)9-F-19.

[10] 9-F-19(n,THS)9-F-19. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

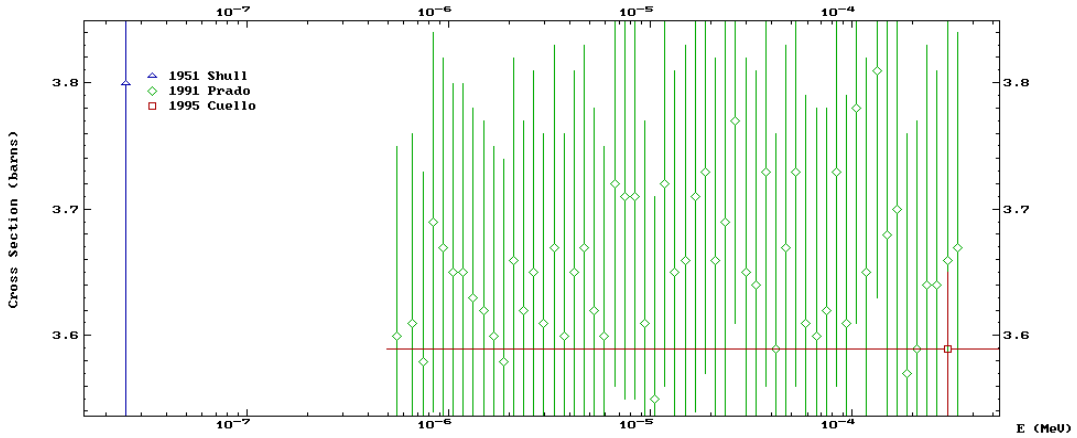


Figura 82. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,THS)9-F-19.

[11] 9-F-19(n,TOT); sus secciones eficaces son:

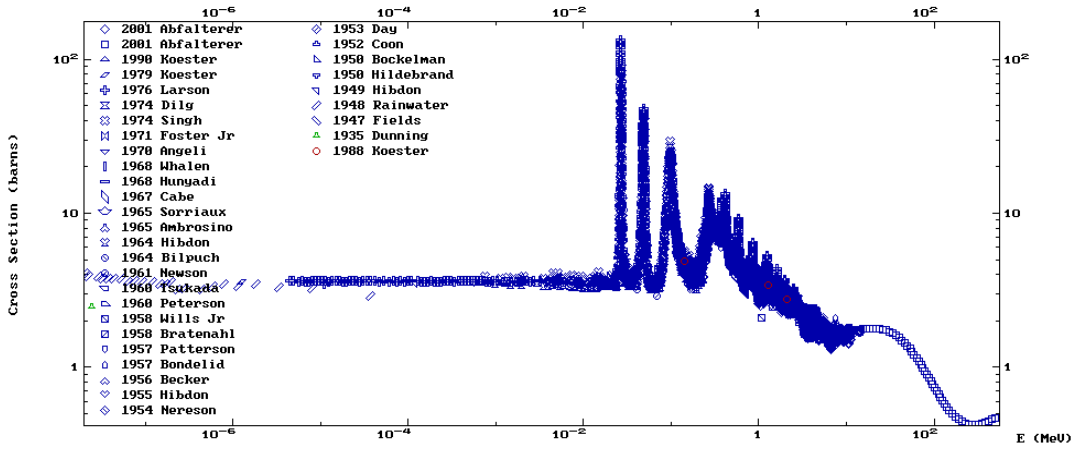


Figura 83. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(n,TOT).

[12] 9-F-19(N,X)0-G-0, Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

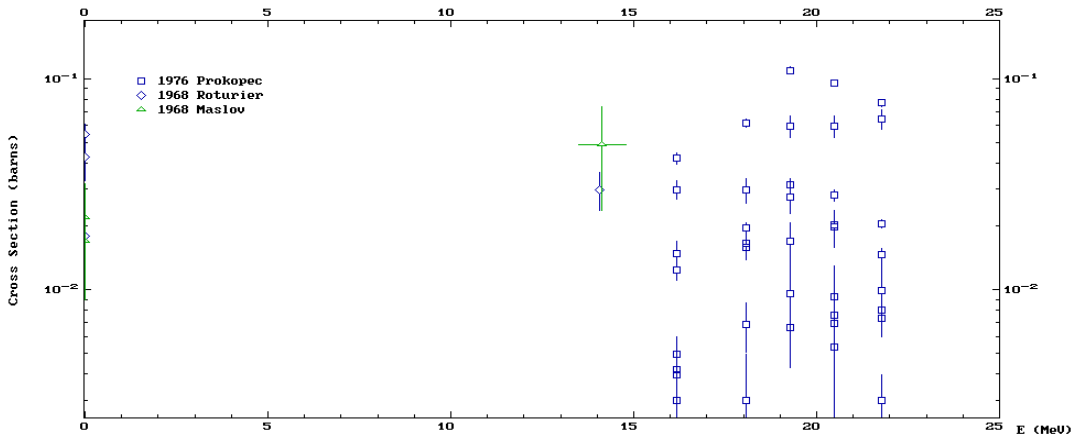


Figura 84. Sección eficaz de la reacción 9-F-19(N,X)0-G-0.

En la Tabla 42, se resumen las características de las reacciones anteriores.

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
9-F-19(n,2n)9-F-18	Por encima del rango de energía de la fuente de neutrones		Sin interés
9-F-19(n,α)7-N-16	Está dentro de rango de energía de la fuente de neutrones	Entre 0 y 0,3	Es necesario estudiar el producto de la reacción
9-F-19(n,D)8-O-18	Por encima del rango de energía de la fuente de neutrones		Sin interés
9-F-19(n,EL)9-F-19	Por debajo del rango de energía de la fuente de neutrones		Sin interés
9-F-19(n,g)9-F-20	Por debajo del rango de energía de la fuente de neutrones	Hasta 0,02	Es necesario estudiar el producto de la reacción y la emisión gamma producida durante la irradiación
9-F-19(n,INL)9-F-19	Por debajo y por encima del rango de energía de la fuente de neutrones	Sin interés	Sin interés, solo producen choques inelásticos.
9-F-19(N,NON)	Por encima del rango de energía de la fuente de neutrones	0.8	Sin interés
9-F-19(n,p)8-O-19	Una pequeña parte en el rango	Menos de 0,01 en la parte de rango de energía de los neutrones	Es necesario estudiar el producto de la reacción
9-F-19(n,SCT)9-F-19	Por debajo del rango de energías de la fuente de neutrones		Sin interés
9-F-19(n,THS)9-F-19	Por debajo del rango de la energía de la fuente		Sin interés
9-F-19(N,X)0-G-0	Por encima del rango de energía de la fuente de neutrones		Sin interés

Tabla 42. Resumen de las reacciones del flúor con los neutrones.

Se concluye que las reacciones que tienen lugar en el rango de energías de los neutrones de una fuente de americio berilio, como la que se usará en esta investigación, y que ofrecen una mayor sección eficaz en este campo de energías de neutrón son las correspondientes a:

- 9-F-19(n,p)8-O-19
- 9-F-19(n,g)9-F-20 y
- 9-F-19(n,α)7-N-16,

y sobre ellas haremos los estudios posteriores.

5.2.1. Reacción 9-F-19(n,p)8-O-19

Las caracteristicas del 8-O-10 son:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{19}_{8}$O	0	5/2+	26.88 s	β-: 100 %	4819.6 29	$^{19}_{9}$F

Tabla 43. Características de decaimiento del 19O.

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
89,4	270	5E-4	4E-7
152,4	442	0,098	1,50E-4
293,1	787	5E-4	1,5E-6
307,5	821	5E-4	1,5E-6
346,1	911	0,0081	2,80E-5
857,6	2040	1,0E-3	9E-6
1442,5	3266	54,4	0,785
1488,5	3361	0,005	7E-5
1543,2	3474	0,0170	2,6E-4
2103,2	4622	45,4	0,95
2146,0	4710	0,06	0,0012
2199,8	4820	2,0	0,04

Tabla 44. . Energía β de decaimiento del 19O.

- Emisión Gamma y X.:

Energía (keV)	Intensidad %	Dosis(MeV/Bq-s)
109,894	2,54	0,00279
197,14	95,9	0,189
1149	5E-4	5,745E-6
1236	0,0170	2,10E-4
1356,843	50,4	0,684
1444,085	2,64	0,0381
1553,970	1,39	0,0216
2353,98	0,00181	4,3E-5
2582,517	0,0189	4,88E-4
3710,64	0,00110	4,1E-5
3797,87	0,00133	5,1E-5
3907,74	0,00384	1,50E-4
4180,063	0,0792	0,00331

. Tabla 45. Energía de radiación γ y X producida en el decaimiento del 19O.

Luego, el decaimiento del 19O produce una emisión de rayos gamma de unos 1356 keV. simultáneamente a la activación.

5.2.2. Reacción 9-F-19(n,g)9-F-20.

Como se ha visto anteriormente, el flúor al exponerse a los neutrones termales produce simultáneamente el isótopo F20 y una radiación gamma llamada de captura. Posteriormente, el F20 decae emitiendo una radiación gamma característica.

Vamos a analizar,

- en primer lugar las secciones eficaces detalladas de esta reacción,
- a continuación, la energía de los rayos gamma de captura que se producen, y
- finalmente, el decaimiento del F20 con la radiación producida.

sin perder de vista que, la fuente de Americio Berilio emite únicamente neutrones rápidos, y que los únicos neutrones termales que pueden existir son los procedentes de la termalización de los neutrones rápidos.

a. secciones eficaces.

Estos valores se han expresado en el siguiente gráfico (Figura 85) en función de la energía.

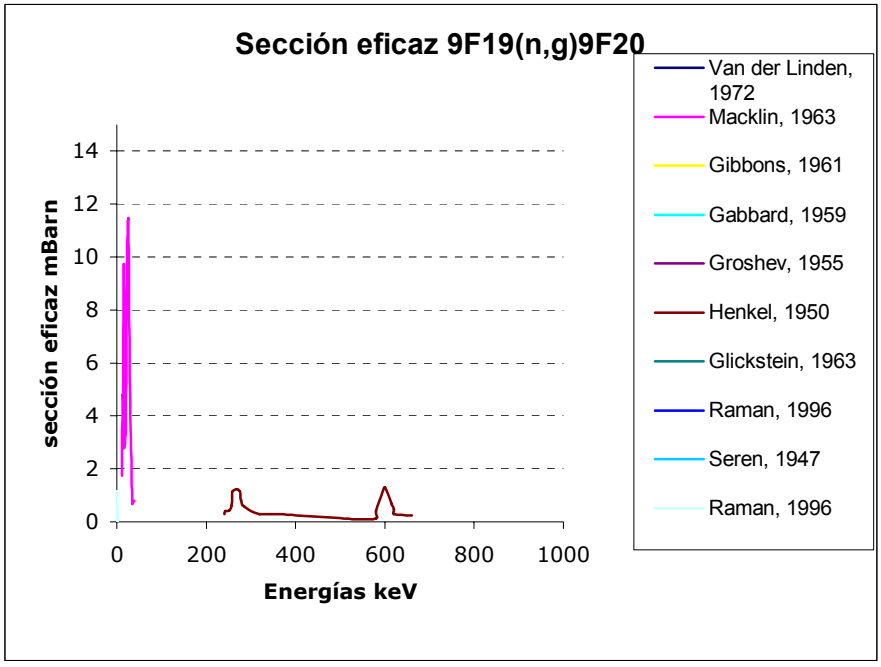


Figura 85. Sección eficaz de la reacción 9F19(n,g)9F20.

La sección eficaz máxima se produce a una energía de los neutrones entre 10^{-1} y 10^{-2} MeV y su valor máximo es de 20 mbarns mucho menor que la sección eficaz de la reacción9-F-19(n,α)7-N-16.

b. Energía de los rayos gamma de captura.

La energía principal de los rayos gamma de captura producidos simultáneamente durante la irradiación es, como se ve en la siguiente tabla (Tabla 46), 583.55 keV

Energía γ (keV)	Iγ/Iγ(max) (%)
166,78	12,23
252,65	0,21
302,20	0,13
325,73	1,14
534,60	0,37
556,41	5,60
583,55	100,00
620,44	0,63
653,20	0,55
656,00	55,01
661,63	4,20
662,24	2.83
665,20	41,40
670,10	0,08
691,40	0,11
734,84	0,16
771,71	0,21
791,20	0,11
793,36	0,18
820,90	0,13
822,69	6,08
885,00	0,13
894,10	0,08
978,19	1,69
983,53	32,23
987,20	0,11
1020,90	0,08
1046,00	4,91
1056,78	26,10
1135,38	0,24
1148,05	7,34
1187,70	1,24
1282,14	2,38
1306,20	0,24
1309,17	21,11
1318,52	0,63
1371,53	4,02
1375,20	0,13

Energía γ (keV)	Iγ/Iγ(max) (%)
1387,90	23,06
1392,22	2,17
1542,50	7,61
1545,87	0,37
1555,00	0,13
1644,50	2,03
1708,52	0,71
1742,70	0,16
1836,50	0,45
1843,74	16,94
1853,96	0,37
1935,50	2,03
1970,73	2,51
1970,95	0,29
2009,52	1,29
2038,08	0,42
2042,00	0,13
2043,89	1,90
2052,80	0,13
2079,72	0,32
2120,95	0,40
2143,26	5,44
2179,09	2,54
2187,96	0,37
2194,16	3,70
2208,50	0,05
2229,80	1,45
2232,90	0,58
2255,82	2,40
2309,96	1,14
2324,11	3,25
2337,58	0,40
2346,30	0,58
2349,55	0,87
2352,44	0,48
2370,88	0,21
2427,83	5,28
2431,08	9,72

Energía γ (keV)	Iγ/Iγ(max) (%)
2431,43	1,96
2447,58	3,91
2458,00	0,16
2469,34	5,47
2504,54	1,06
2519,05	1,96
2529,20	16,12
2529,55	2,51
2556,35	0,45
2600,30	0,11
2602,75	0,98
2623,18	1,22
2636,11	2,69
2655,74	2,17
2690,50	0,16
2697,90	0,11
2864,68	0,45
2921,01	2,62
2930,31	2,38
2933,76	0,63
2965,90	2,54
2969,70	0,45
2981,25	0,98
3014,58	11,25
3023,90	0,90
3025,10	2,11
3051,43	8,24
3070,90	0,55
3074,81	5,26
3098,10	0,18
3112,72	6,66
3152,10	0,40
3219,89	1,69
3293,23	0,71
3387,56	1,69
3475,30	0,13
3488,13	20,00
3534,40	0,40

Energía γ (keV)	Iγ/Iγ(max) (%)
3578,60	0,24
3586,23	8,06
3589,47	4,94
3607,80	0,58
3679,91	2,40
3711,00	0,34
3741,44	1,61
3823,05	2,93
3891,39	0,50
3894,20	0,34
3964,85	12,26
3973,47	0,66
4009,30	0,29
4046,71	1,00
4070,00	0,18
4081,77	1,51
4092,20	0,48
4095,01	0,77
4173,54	4,65
4200,56	3,01
4225,80	0,16
4245,65	2,59
4262,50	0,08
4313,29	0,50
4335,09	1,29
4556,81	14,50
4626,50	0,21
4630,60	0,16
4639,00	0,63
4708,19	1,45
4735,22	1,51
4757,02	5,26
4878,80	0,24
4899,20	0,18
4951,91	1,64
4954,50	0,58
4960,30	0,74
5033,50	17,23

Energía γ (keV)	Iγ/Iγ(max) (%)
5279,27	11,73
5282,10	0,21
5291,40	6,55
5318,32	0,53
5360,93	3,30
5543,67	11,39
5554,59	1,45
5616,82	3,83
5622,50	0,21
5935,10	2,69
5938,10	0,32
6016,72	26,10
6600,08	26,10

Tabla 46. Energía de los rayos gamma de captura de la reacción 9F19(n,g)9F20.

Estos valores se reflejan en la siguiente gráfica:

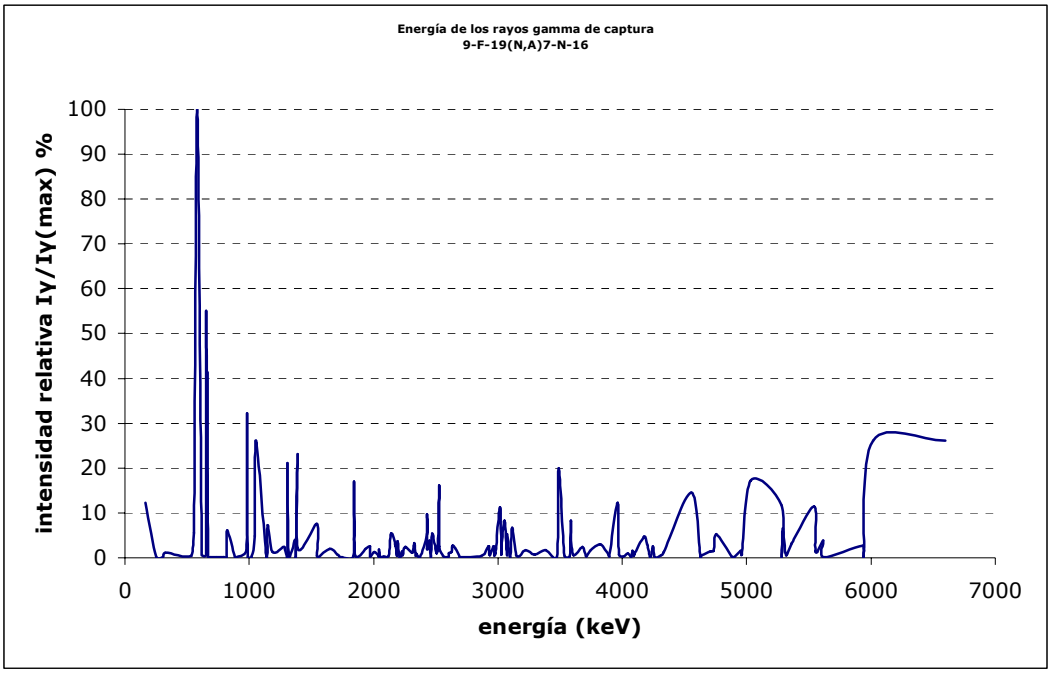


Figura 86. Energía de los rayos gamma de captura de la reacción 9F19(n,g)9F20.

c. Decaimiento del 20F.

Finalmente el 20F decae espontáneamente según las siguientes características de decaimiento:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{20}_{9}F$	0	2+	11,163 s	β^-: 100 %	7024,53	$^{20}_{10}Ne$

Tabla 47. Características de decaimiento del 16N.

Emitiendo:

- Energía Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
866,8	2058,02	0,0082 %	7,1E-5
2481,5	5390,86	99,9913 %	2,481284
3286,2	7024,53	5E-4 %	1,6E-5

Tabla 48. Energía β de decaimiento del 16N

  - Energía β principal: 2481.37 keV 4,
  - intensidad β total: 100.0000 % 11,
  - dosis beta-media: 2.48137 MeV/Bq-s 5
- Radiación Gamma y Rayos X:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1.633,602	99,1 %	1,633594
3.332,54	0,0082 %	2,73E-4
4.965,85	5,0E-5 %	2,5E-6

Tabla 49. Energía de radiación γ y X producida en el decaimiento del 16N.

- Con el siguiente esquema de decaimiento

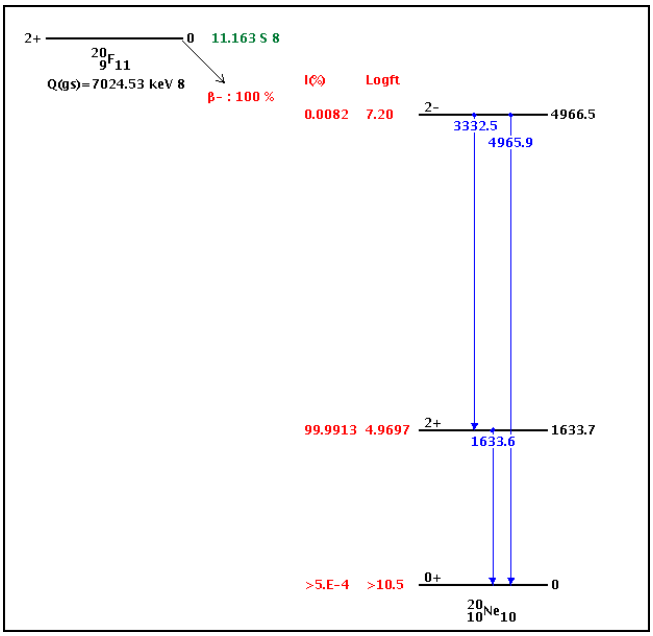


Figura 87. Esquema de decaimiento del 20F.

5.2.3. Reacción 9-F-19(n,a)7-N-16

El flúor reacciona con los neutrones y emite partículas alfa y nitrógeno 16, según la reacción siguiente:

9-F-19(n,α)7-N-16.

Las secciones eficaces de esta reacción en el rango de energías de la fuente de neutrones de Americio Berilio, se reflejan en la siguiente gráfica. (Figura 88).

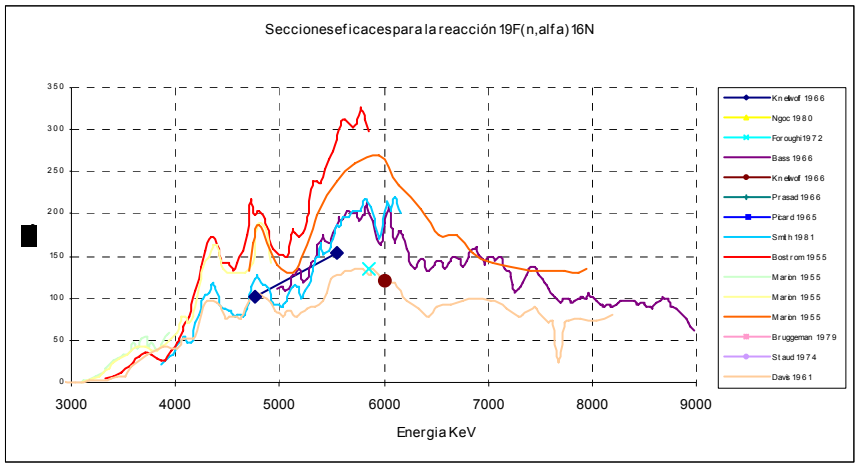


Figura 88. Secciones eficaces de la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16

La importancia de esta reacción radica en dos aspectos:

- la sección eficaz, es significativa.
- las partículas alfa producidas no afectarán al proceso ya que se detienen muy fácilmente.
- y, por otra parte, como se verá a continuación, las características de decaimiento del Nitrógeno 16 le hacen muy idóneo para su detección y medida, por lo que se deduce la cantidad de flúor a través de la medida de la cantidad de nitrógeno 16.

Se analizará, para esta reacción,

- el decaimiento del 16N, que tiene una emisión relevante en el proceso, como se verá más adelante,
- la responsabilidad exclusiva del 9F en la presencia de 16N.

5.2.3.1. El decaimiento del Nitrógeno 16

El Nitrógeno 16 es un isótopo radiactivo que decae espontáneamente con las siguientes características según KELLEY et al. [226] es:

- Vida media: 7,13 s
- Modo de decaimiento β-
- Núcleo hijo: $^{16}_{8}O$
- Esquema de decaimiento:

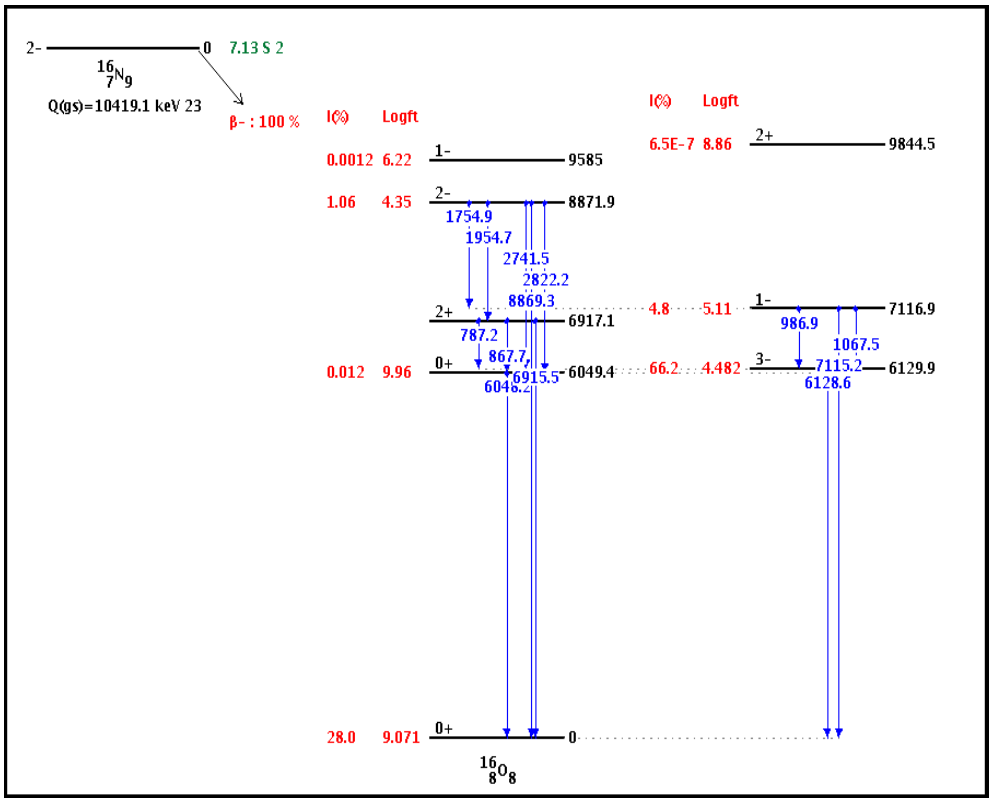


Figura 89. Esquema de decaimiento del 16N.

En su decaimiento produce:

- Energías Beta-: con las caracterísiticas siguientes: (Tabla 50)

Energía (keV)	*Energía del punto final (keV)*	*Intensidad (%)*	*Dosis (MeV/Bq-s)*
206,7	574,6	6,5E-7 %	1,3E-9
315,0	834,0	0,0012 %	3,8E-6
630,6	1547,2	1,06 %	0,0067
1461,6	3302,2	4,8 %	0,070
1941,7	4289,2	66,2 %	1,285
1999,0	4370,0	0,012 %	2,4E-4
4979,8	10419,1	28,0 %	1,394

Tabla 50. Energía β producida por el decaimiento del 16N.

- Energía media de β: 2.75E+3 keV 3,
- Intensidad β total: 100.1 % 8,
- Dosis β media: 2.76 MeV/Bq-s 4

- Rayos X y gamma: con las características reflejadas en la Tabla 51.

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
787,2	1,5E-6 %	1,2E-8
867,7	2,100E-4 %	1,822E-6
986,93	0,0034 %	3,4E-5
1067,5	1,5E-5 %	1,6E-7
1754,9	0,121 %	0,00212
1954,7	0,038 %	7,4E-4
2741,5	0,82 %	0,0225
2822,2	0,13 %	0,0037
6048,2	0,14 %	0,0084675
6128,63	67,0 %	4,11
6915,5	0,038 %	0,0026
7115,15	4,9 %	0,35
8869,3	0,076 %	0,0067

Tabla 51. Rayos X y γ producidos por el decaimiento del 16N.

Destaca la emisión de rayos gamma de alta energía que se produce por encima de los 6000 keV. que cualifica al 16N para ser fácilmente detectado.

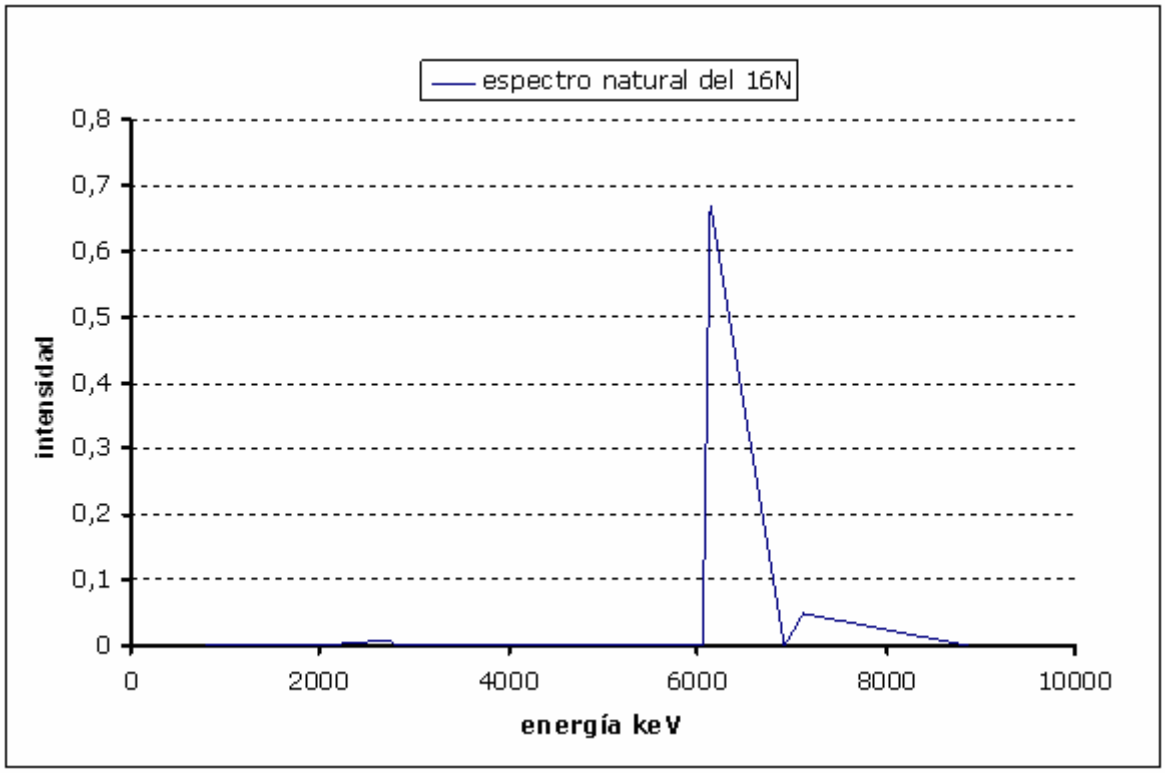


Figura 90. Espectro teórico de emisión del 16N.

5.2.3.2. Interferencias del 16N.

Como ya se ha visto anteriormente, la reacción más importante para determinar el flúor, es la reacción

9-F-19(n,α)7-N-16,

y la determinación del flúor puede hacerse a través de la medición de la cantidad de 16N producido.

La pregunta es, ahora, si existen otras posibles reacciones entre elementos de la muestra y los neutrones que puedan dar lugar a la presencia del N16 con un origen diferente al contemplado por la reacción del F19.

Consultando la bibliografía aportada por la misma base de datos:"CSISRS alias EXFOR Nuclear reaction experimental data", podemos conocer las distintas reacciones nucleares que dan lugar a la presencia del 16N.

A continuación se exponen estas reacciones nucleares, y sus secciones eficaces. Después se discutirán las posibilidades reales de que se produzcan estas reacciones, en nuestros ensayos.

Las reacciones que dan lugar a la aparición del 16 N son:

- 4-BE-9(4-BE-9,D)7-N-16
- 4-BE-9(4-BE-9,N+p)7-N-16
- 5-B-11(3-LI-7,N+p)7-N-16
- 5-B-11(3-LI-7,X)7-N-16
- 6-C-12(3-LI-8,A)7-N-16
- 6-C-12(7-N-17,X)7-N-16
- 6-C-14(A,D)7-N-16
- 7-N-15(D,P)7-N-16
- 8-O-16(n,p)7-N-16
- 8-O-17(G,G+p)7-N-16
- 8-O-17(n,D)7-N-16
- 8-O-18(D,A)7-N-16
- 8-O-18(G,D)7-N-16
- 8-O-18(G,N+p)7-N-16
- 9-F-19(n,α)7-N-16
- 47-AG-0(P,X)7-N-16

Las secciones eficaces de todas estas reacciones se resumen en la siguiente Figura 91.

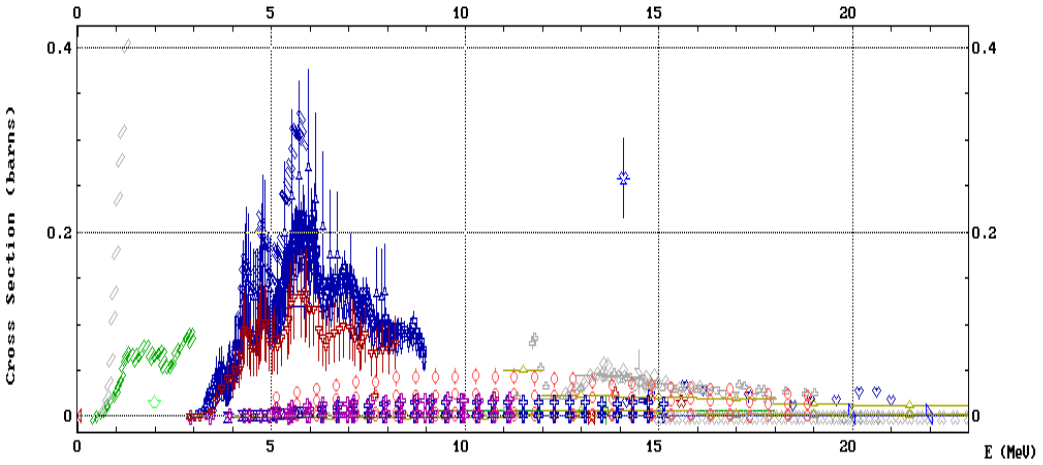


Figura 91. Secciones eficaces de las reacciones que pueden producir 16N.

A continuación se exponen, en el eje vertical, las secciones eficaces, expresadas en barns, de cada una de las reacciones anteriores de las que hay datos.

i. 4-BE-9(4-BE-9,N+p)7-N-16

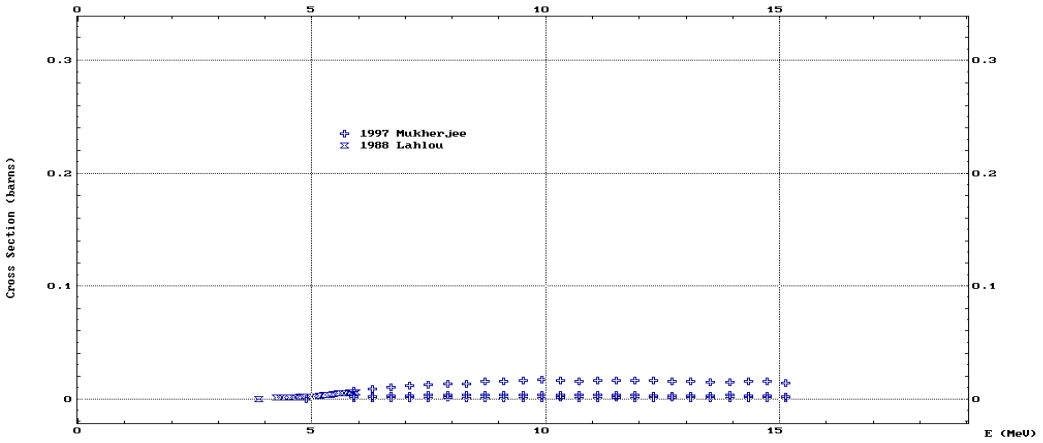


Figura 92. Sección eficaz de la reacción 4-BE-9(4-BE-9,N+p)7-N-16.

ii. 5-B-11(3-LI-7,N+p)7-N-16.

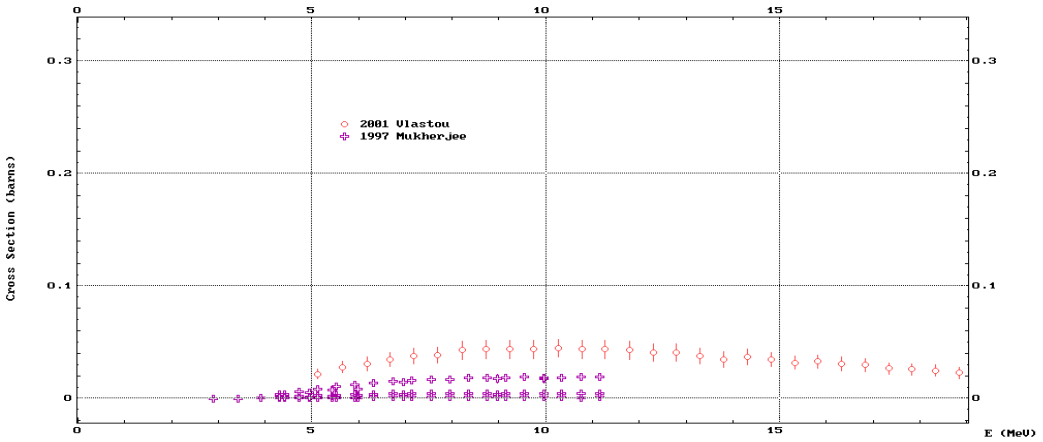


Figura 93. Sección eficaz dela reacción 5-B-11(3-LI-7,N+p)7-N-16.

iii. 5-B-11(3-LI-7,X)7-N-16.

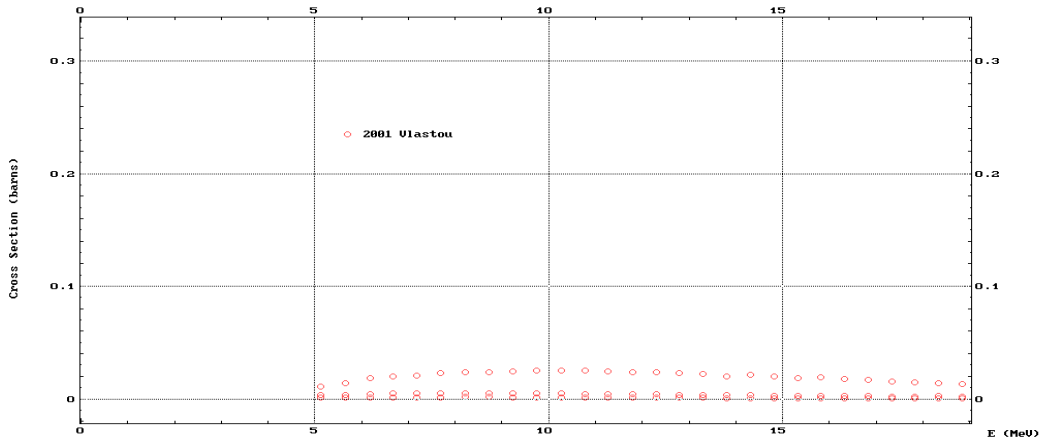


Figura 94. Sección eficaz dela reacción 5-B-11(3-LI-7,X)7-N-16

iv. 6-C-12(7-N-17,X)7-N-16.

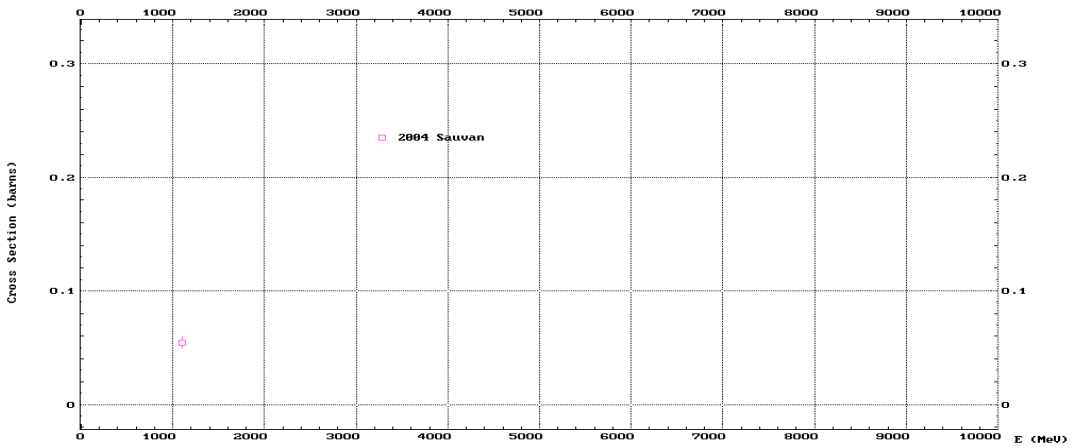


Figura 95. Sección eficaz dela reacción 6-C-12(7-N-17,X)7-N-16.

v. 7-N-15(D,P)7-N-16.

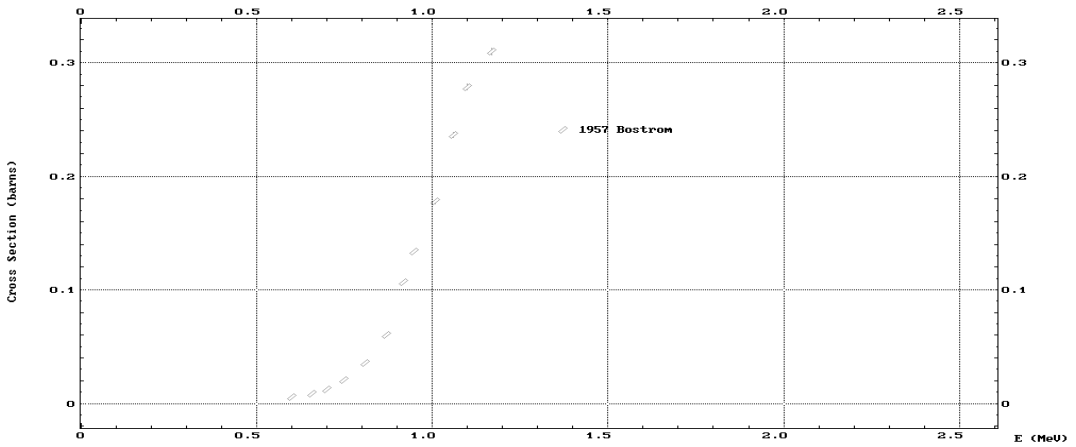


Figura 96. Sección eficaz dela reacción 7-N-15(D,P)7-N-16.

vi. 8-O-16(n,p)7-N-16.

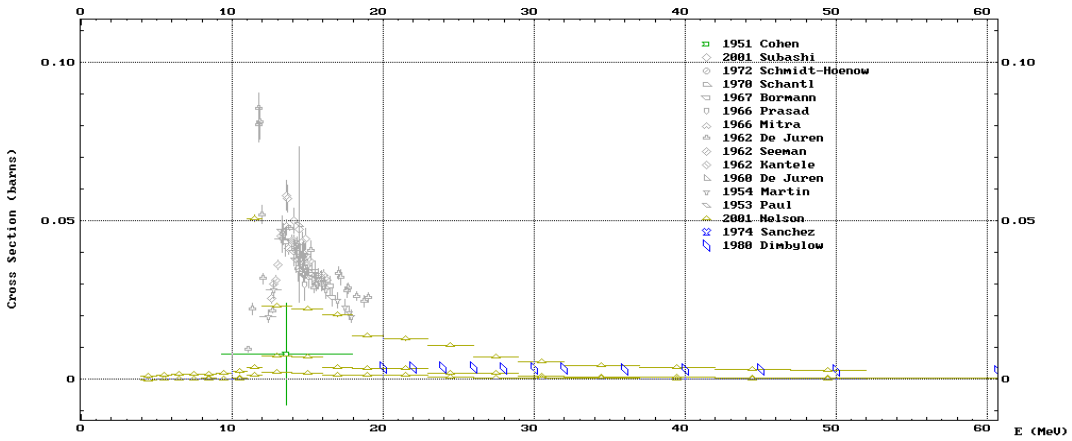


Figura 97. Sección eficaz dela reacción 8-O-16(n,p)7-N-16.

vii. 8-O-17(n,D)7-N-16.

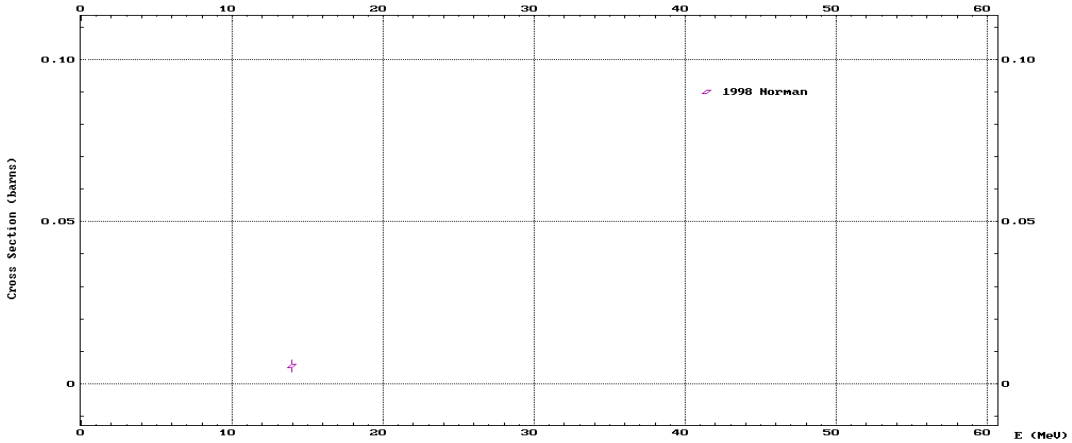


Figura 98. Sección eficaz dela reacción 8-O-17(n,D)7-N-16.

viii. 8-O-18(D,A)7-N-16.

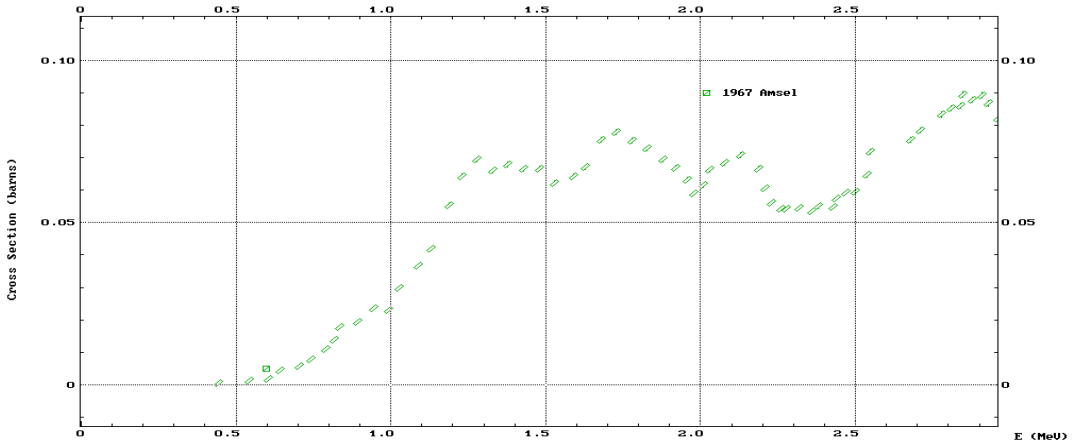


Figura 99. Sección eficaz dela reacción 8-O-18(D,A)7-N-16.

ix. 8-O-18(G,D)7-N-16.

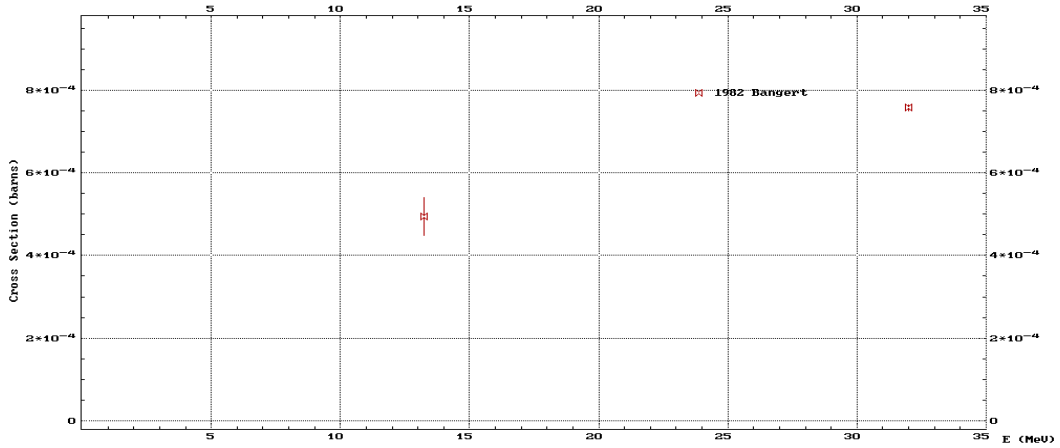


Figura 100. Sección eficaz dela reacción 8-O-18(G,D)7-N-16.

x. 8-O-18(G,N+p)7-N-16.

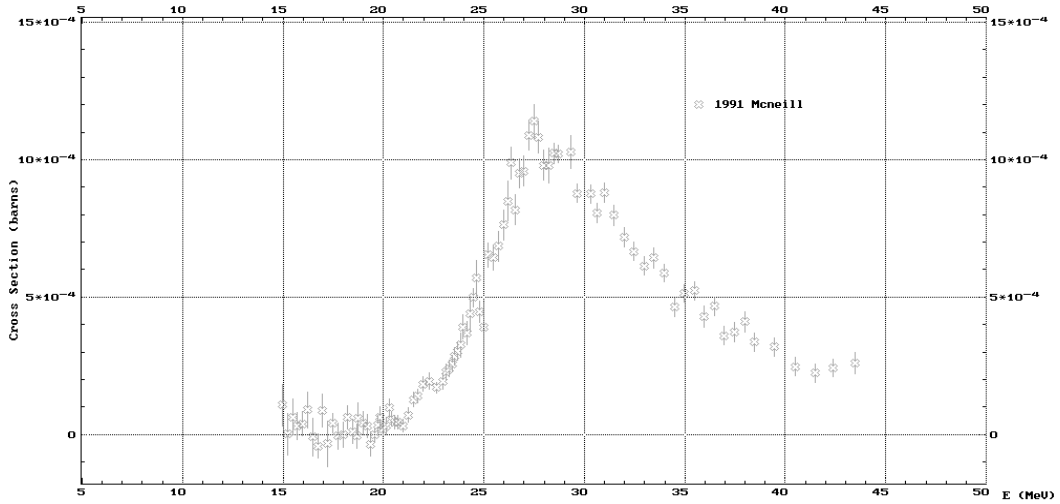


Figura 101. Sección eficaz dela reacción 8-O-18(G,N+p)7-N-16.

xi. 9-F-19(n,α)7-N-16. para esta reacción hay las siguientes gráficas: Figura 102,Figura 103 y Figura 104.

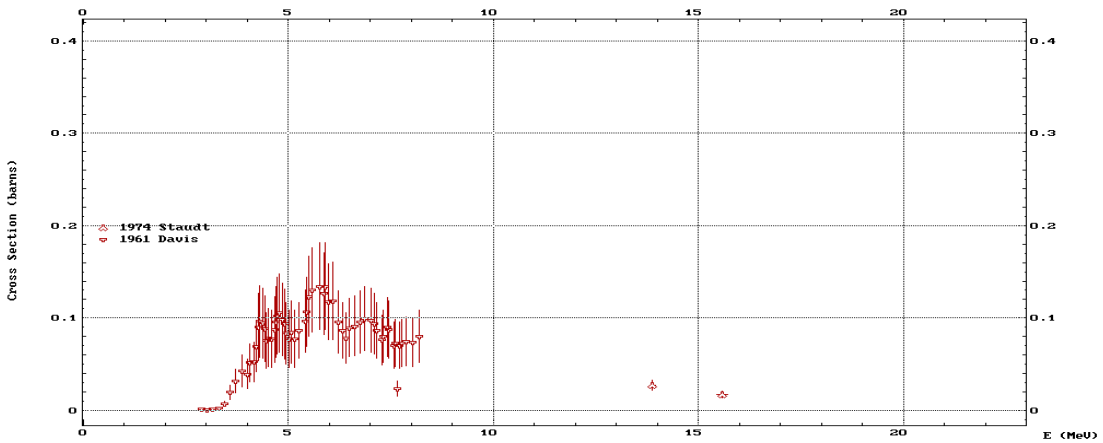


Figura 102. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (a)

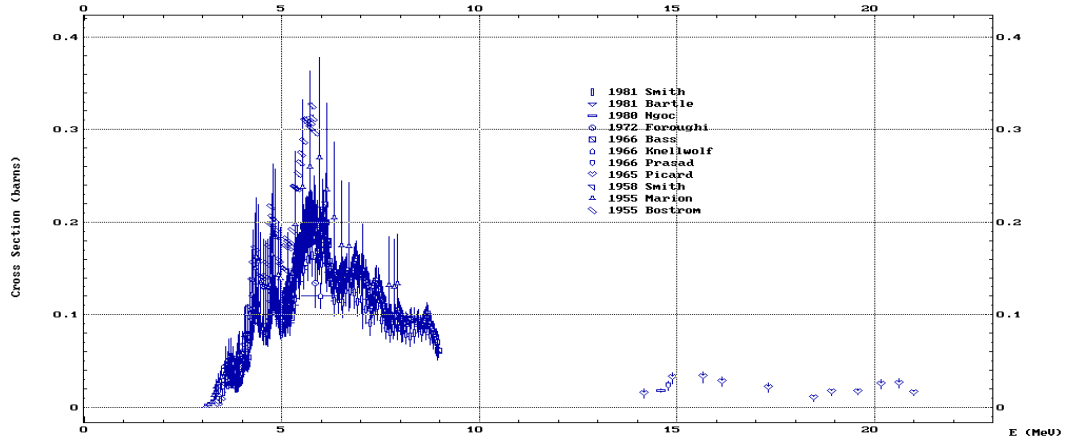


Figura 103. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (b)

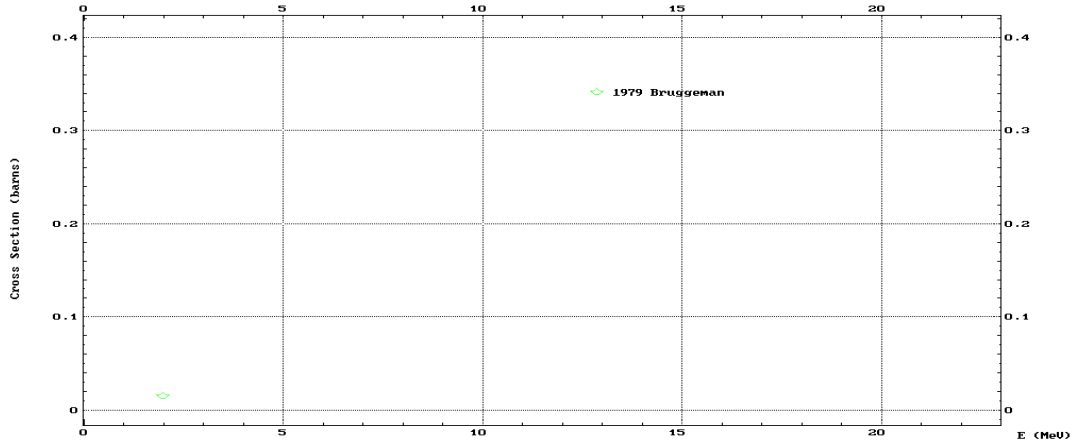


Figura 104. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (c)

5.2.4. Conclusiones de las reacciones del flúor con los neutrones.

[1] En conjunto, todas las secciones eficaces correspondientes al flúor se resumen en esta gráfica.

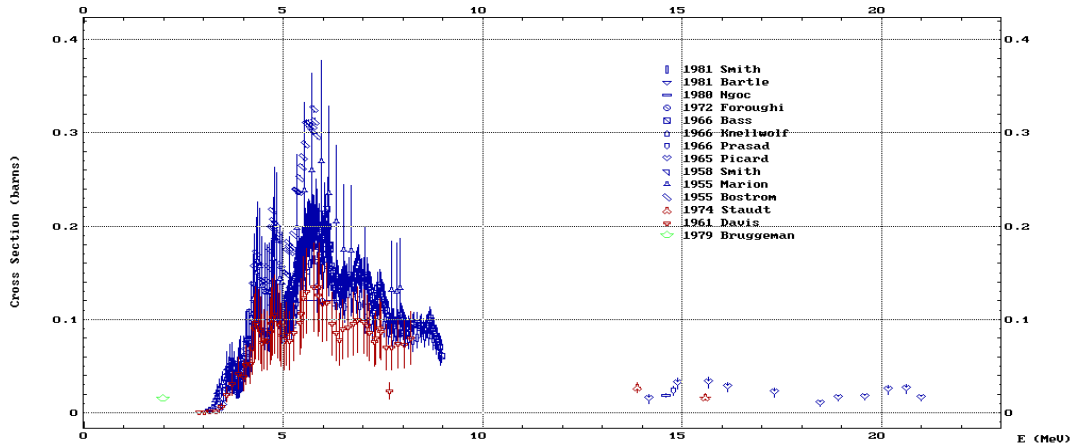


Figura 105. Sección eficaz dela reacción 9-F-19(n,α)7-N-16. (total)

Estas reacciones, en su conjunto, tienen unas secciones eficaces como se ha visto anteriormente.

[2] De entre estas reacciones, las que nos podemos encontrar en nuestro ensayo serán:

- 8-O-16(n,p)7-N-16.
- 8-O-17(n,D)7-N-16.
- 9-F-19(n,α)7-N-16.

y las secciones eficaces de estas reacciones se muestran en la Figura 106, en las que, para diferenciarlas se muestra en diferentes colores, correspondiendo:

- Color azul →8-O-16(n,p)7-N-16.
- Color verde →8-O-17(n,D)7-N-16.
- Color rojo →9-F-19(n,α)7-N-16.

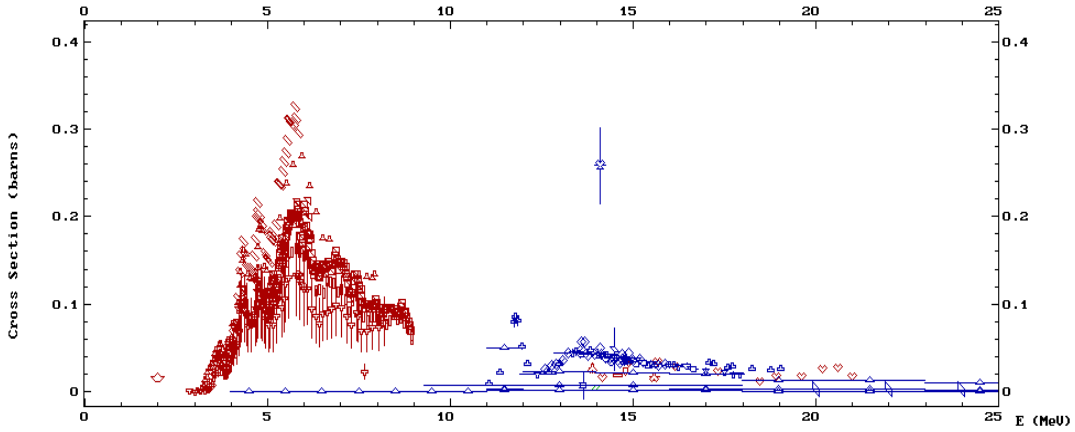


Figura 106. Secciones eficaces delas reacciones que den lugar a la presencia de 16N en la muestra de fluorita.

[3] La energía de los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio, se extiende en un intervalo de energías que entre 3 y 10 MeV. aproximadamente. En este intervalo la sección eficaz más significativa es la que corresponde a la reacción con el flúor, de donde se deduce que el flúor es el *único* responsable de la presencia de 16N, y que la lectura del mismo estará relacionada únicamente con la presencia original.

[4] En resumen, la elevada energía de rayos gamma de 6128 keV que se pueda detectar inmediatamente después de la irradiación de una muestra de fluorita con neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio, corresponde al decaimiento del 16N, y éste, a su vez, está directamente relacionado con la ley de flúor, es decir, de fluorita, en la muestra.

Se debe analizar, ahora, si puede haber algún otro elemento en la muestra que de lugar a emisiones de rayos gamma de una energía similar a la del 16N, para lo cual, se plantea el estudio de las emisiones originadas por la irradiación de neutrones sobre los demás elementos de la muestra.

5.3. Estudio del Calcio.

El calcio tiene los siguientes isótopos:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{40}Ca	96,97	39,9626	0	--	estable
^{41}Ca	0	41	7/2	1,03E05y	EC
^{42}Ca	0,64	41,9586	0	--	estable
^{43}Ca	0,145	42,9588	7/2	--	estable
^{44}Ca	2,06	43,9555	0	--	estable
^{45}Ca	0	44,956	7/2	162,7d	β^-
^{46}Ca	0,0033	45,9537	0	--	estable
^{47}Ca	0	46,954	7/2	4,536d	β^-
^{48}Ca	0,18	47,9525	0	--	estable
^{49}Ca	0	49	3/2	8,72m	β^-

Tabla 52 Isótopos del Calcio.

En este caso, el 40 Ca es el elemento con una mayor presencia en la naturaleza. A continuación se detallan las reacciones del ^{40}Ca y del ^{44}Ca con los neutrones y sus respectivas secciones eficaces. Se ha desestimado el estudio de los otros isótopos al tener poca representatividad en la muestra.

5.3.1. Reacciones del 40Ca con los neutrones.

[1] 20-CA-40(n,2n)20-CA-39. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

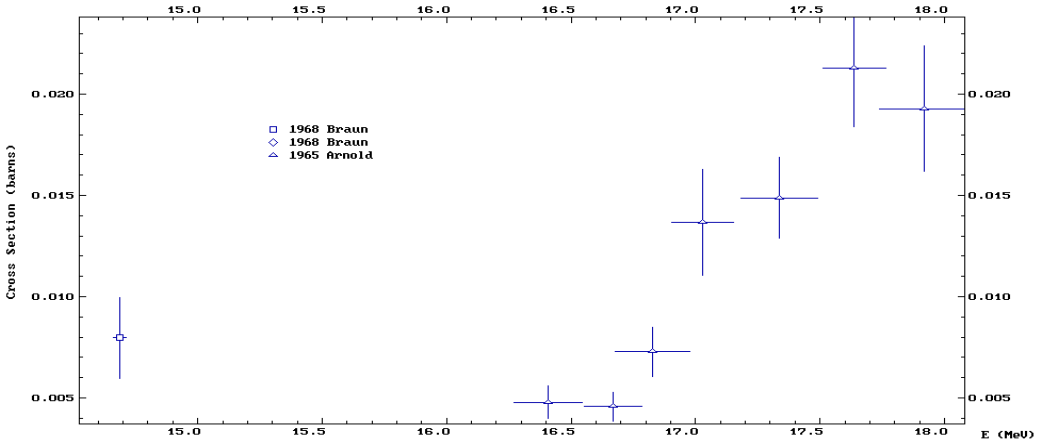


Figura 107. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,2n)20-CA-39

[2] 20-CA-40(n,α)18-AR-37 Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

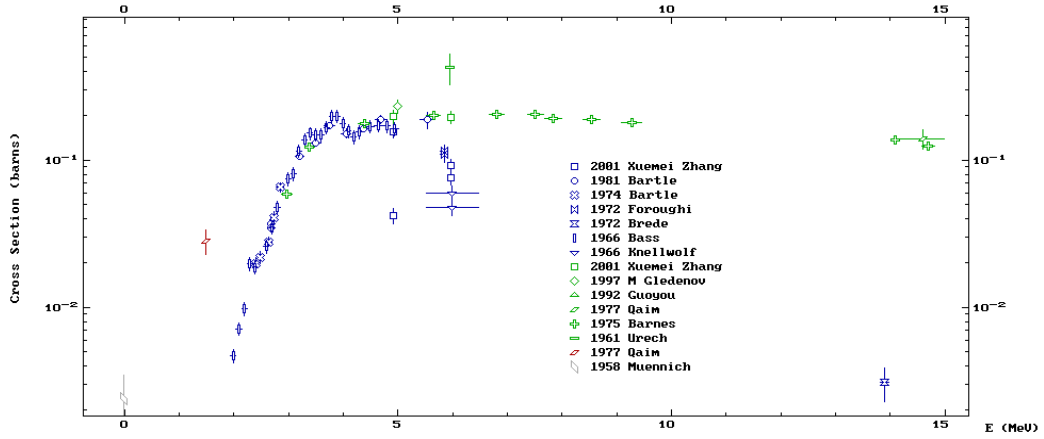


Figura 108. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,α)18-AR-37.

[3] 20-CA-40(n,D)19-K-39. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

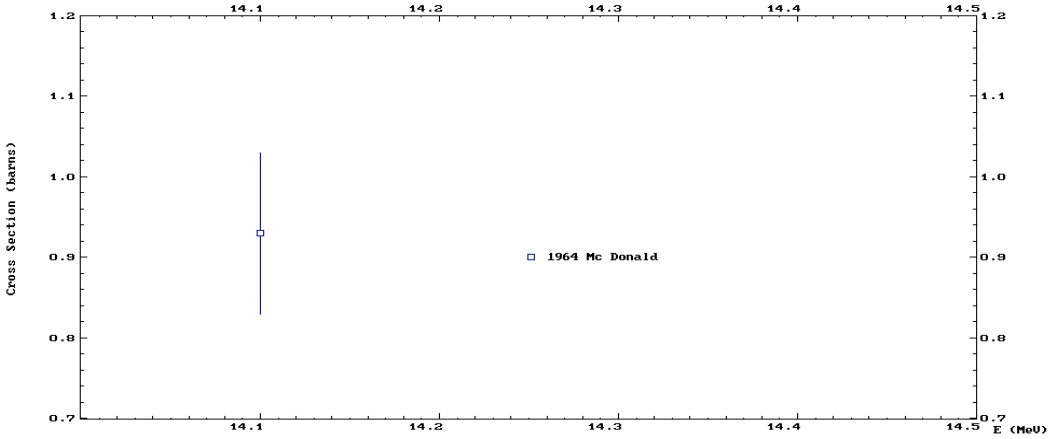


Figura 109. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,D)19-K-39.

[4] 20-CA-40(n,g)20-CA-41. Con las siguientes secciones eficaces.

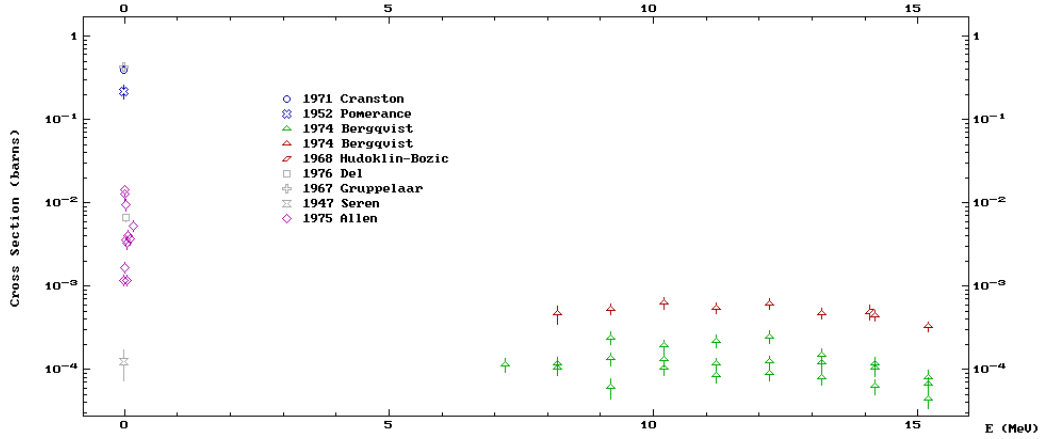


Figura 110. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,g)20-CA-41.

[5] 20-CA-40(n,INL)20-CA-40 Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

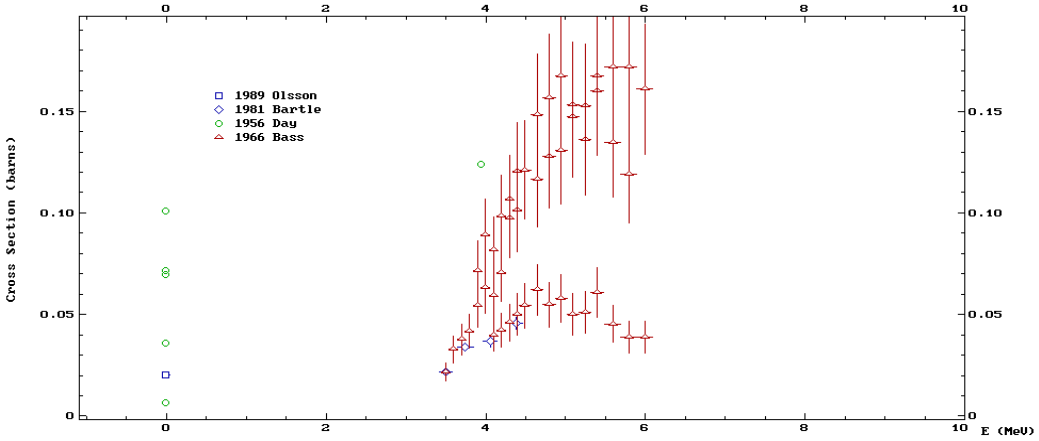


Figura 111. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,INL)20-CA-40

[6] 20-CA-40(n,n+α)18-AR-36 Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

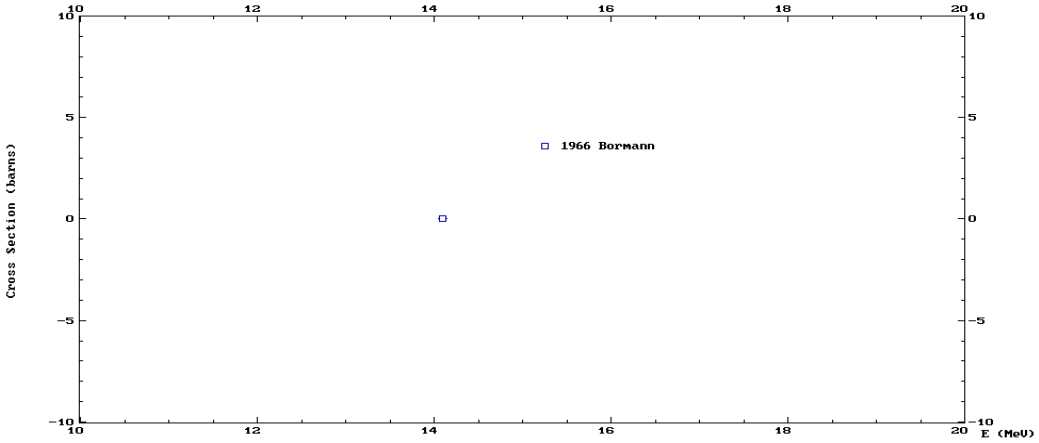


Figura 112. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,n+α)18-AR-36

[7] 20-CA-40(n,n+p)19-K-39 La sección eficaz es

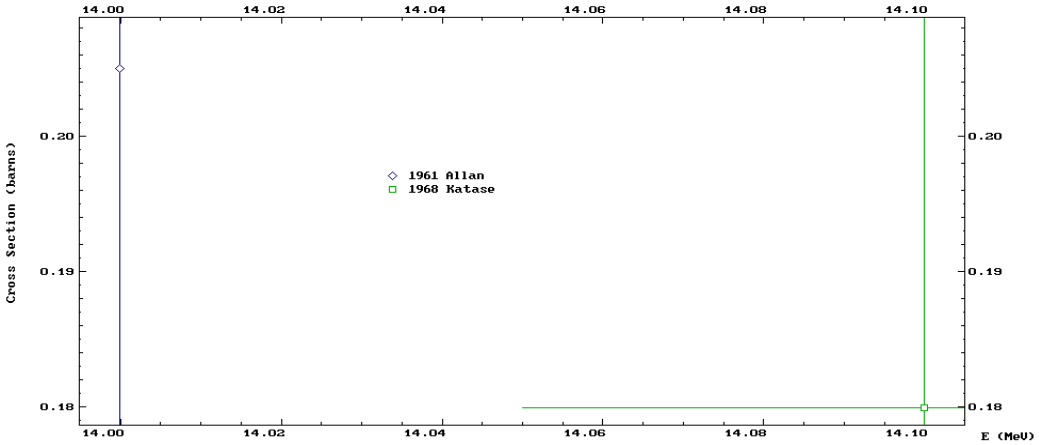


Figura 113. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,n+p)19-K-39

[8] 20-CA-40(n,p)19-K-40 La sección eficaz correspondiente es

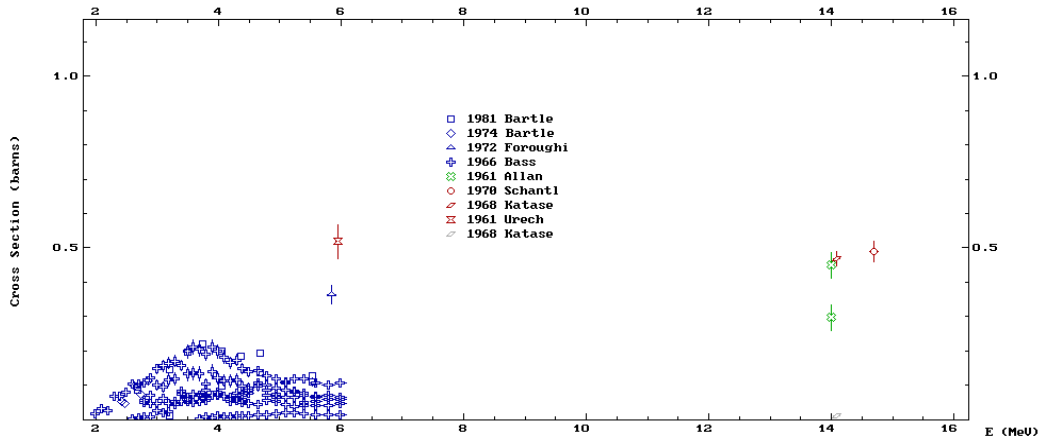


Figura 114. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,p)19-K-40

[9] 20-CA-40(n,T)19-K-38 Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

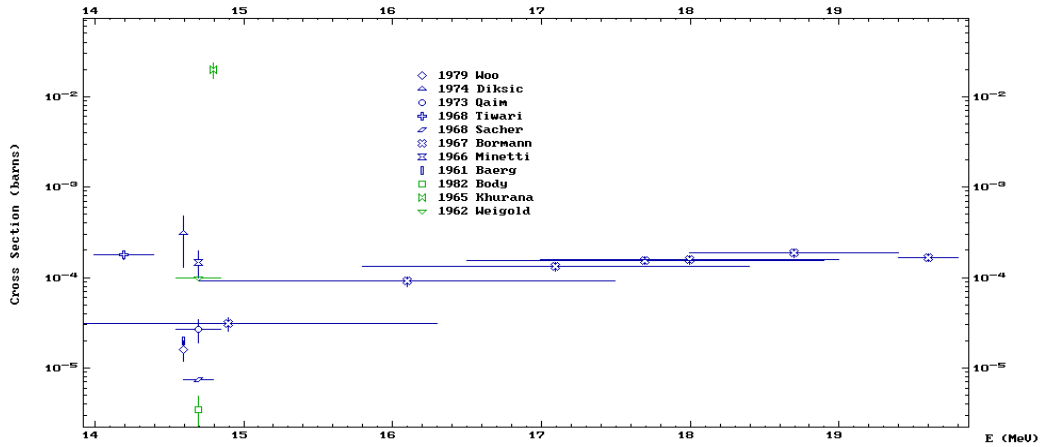


Figura 115. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,T)19-K-38

[10] 20-CA-40(n,THS)20-CA-40 En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

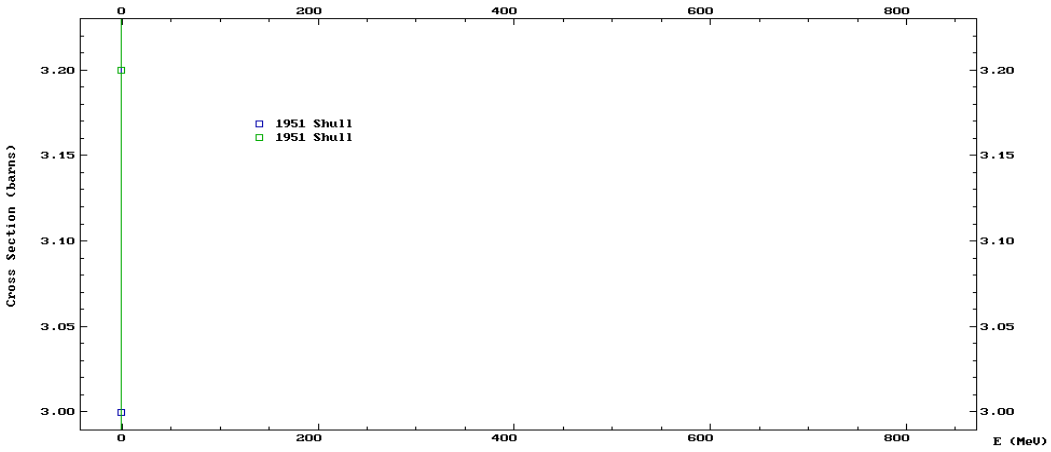


Figura 116. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,THS)20-CA-40

[11] 20-CA-40(n,TOT) sus secciones eficaces son

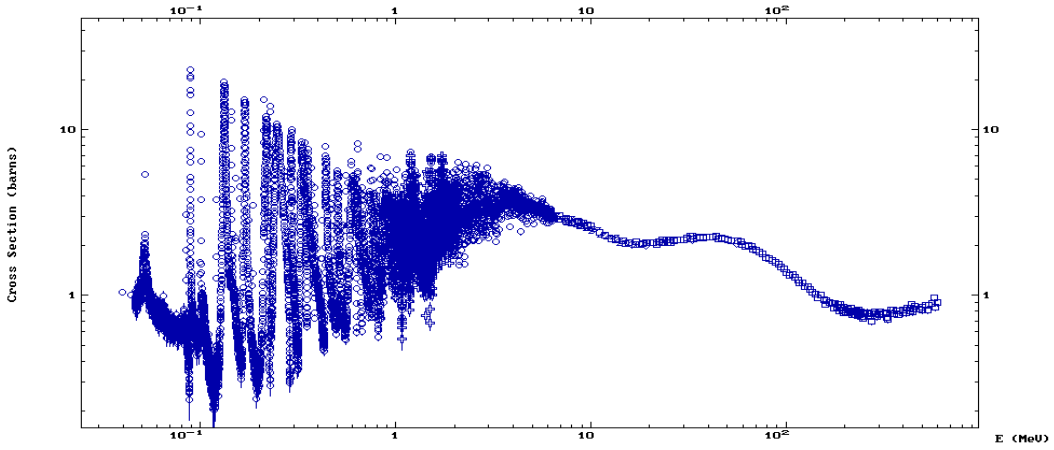


Figura 117. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(n,TOT)

[12] 20-CA-40(N,X)0-G-0 Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

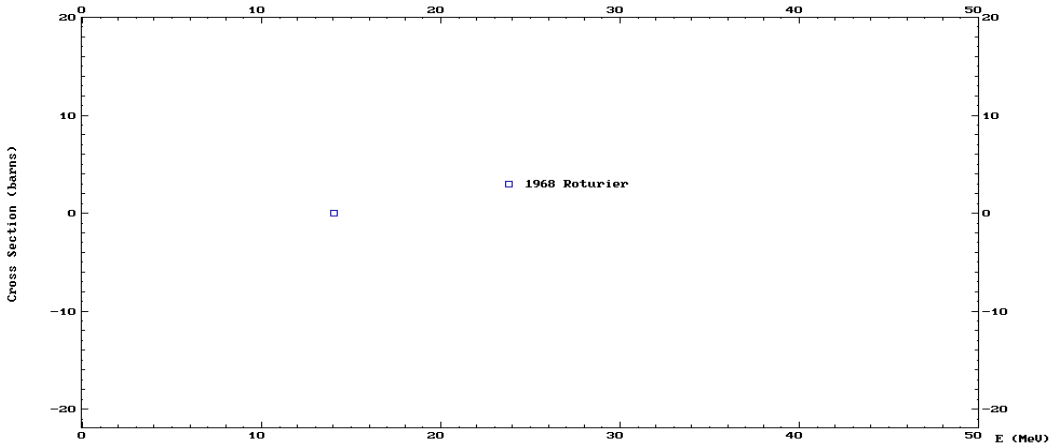


Figura 118. Sección eficaz de la reacción 20-CA-40(N,X)0-G-0

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del calcio con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
20-CA-40(n,2n)20-CA-39	Por encima de 15 MeV	0,005-0,020	Sin interés
20-CA-40(n,α)18-AR-37	Entre 2 y 15 MeV	0,005-0,03	Es necesario estudiar el producto de la reacción: 18Ar37
20-CA-40(n,D)19-K-39	Más de 14 MeV		Sin interés
20-CA-40(n,g)20-CA-41	Más de 8 MeV	10^{-4}-10^{-3}	Sin interés
20-CA-40(n,INL)20-CA-40			Sin interés, solo producen choques inelásticos.
20-CA-40(n,n+α)18-AR-36	Muy elevada		Sin interés
20-CA-40(n,n+p)19-K-39	Muy elevada		Sin interés
20-CA-40(n,p)19-K-40	Entre 2 y 6 MeV		Es necesario estudiar el producto de la reacción: 19K40
20-CA-40(n,T)19-K-38	Muy elevada		Sin interés
20-CA-40(n,THS)20-CA-40	Muy elevada		Sin interés

Tabla 53. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del calcio con los neutrones.

Con ello se concluye que las reacciones de interés en el rango de energías de los neutrones de una fuente de americio berilio, y que tienen una sección eficaz interesante son:

- 20-CA-40(n,α)18-AR-37
- 20-CA-40(n,p)19-K-40

5.3.1.1. Reacción 20-CA-40(n,α)18-AR-37

El 20Ca reacciona con los neutrones y emite partículas alfa. El producto de esta reacción, el 18-AR-37 tiene las siguientes características.

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{37}_{18}Ar$	0	3/2+	35,04 d	ε: 100 %	81,.5	$^{37}_{17}Cl$

Tabla 54. Características de decaimiento del 18-AR-37.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Energía de los electrones.

Energía (keV)	Energía (keV)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger K 2.38	81.31 % *25*	0.001935 *6*

Tabla 55. Energía de los electrones en el decaimiento del 18-AR-37.

- Energía de la radiación Gamma y X.

Energía (keV)	Energía (keV)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR kα2 2,621	2,7 %	7,1E-5
XR kα1 2,622	5,5 %	1,44E-4
XR kβ3 2,816	0,173 %	4,9E-6
XR kβ1 2,816	0,34 %	9,7E-6

Tabla 56. Energía de la radiación γ y X del decaimiento del 18-AR-37.

5.3.1.2. Reacción 20-CA-40(n,p)19-K-40

El 20Ca reacciona con los neutrones y emite protones, dando lugar a la presencia del 19-K-40.

Este isótopo tiene dos tipos de decaimiento:

- Modo 1.

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{40}_{19}K$	0	4-	1.248E+9 y	ε: 10,72%	1504,69	$^{40}_{18}Ar$

Tabla 57. Características de decaimiento del 19-K-40

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta+:

Energía (keV)	Energía del punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
238,2	482,69	0,00100 %	2,4E-6

Tabla 58. Energía de la emisión β en el decaimiento del 19-K-40.

- Electrones:

Energía(keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger K 2.,6	7,1 %	1,95E-4

Tabla 59Energía de la emisión de electrones en el decaimiento del 19-K-40.

- Emisión gamma y X.

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR kα2	2.955	0.30 % *3*	8.8E-6 *10*
XR kα1	2.957	0.61 % *6*	1.79E-5 *18*
XR kβ3	3.19	0.025 % *3*	8.0E-7 *8*
XR kβ1	3.19	0.048 % *5*	1.54E-6 *16*
Annihil.	511.0	0.0020 % *3*	
	1460.822 *6*	10.66 % *18*	0.156 *3*

Tabla 60. Energía de la emisión X y γ en el decaimiento del 19-K-40

- Modo 2:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{40}_{19}K$	0	4-	1,248E+9 y	β-: 89,28 %	1311,07	$^{40}_{20}Ca$

Tabla 61. Características de decaimiento del 19-K-40

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
560.18	1311.07	89.14 %	0.4993

Tabla 62. Energía de la emisión β en el decaimiento del 19-K-40.

5.3.2. Reacciones del 44Ca con los neutrones.

[1] 20-CA-44(n,α)18-AR-41. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

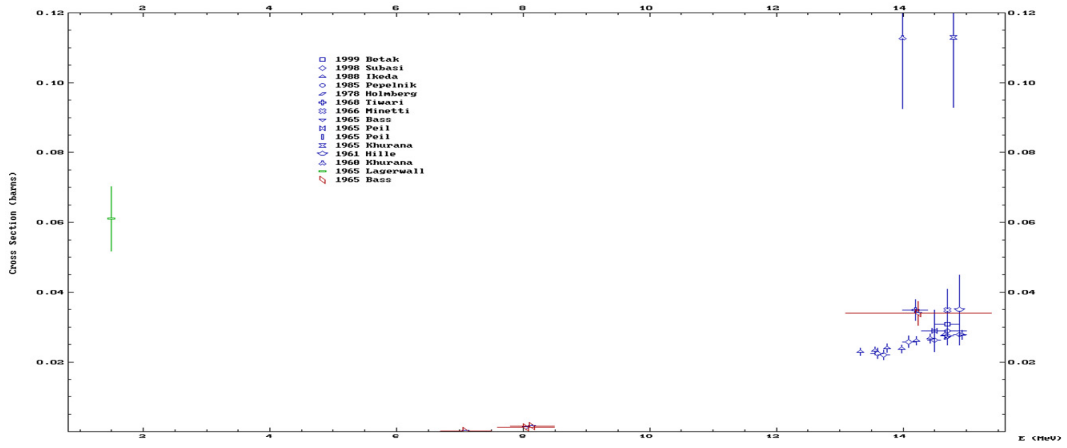


Figura 119. Sección eficaz de la reacción 20-CA-44(n,α)18-AR-41

[2] 20-Ca-44(n,D)19-K-43. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

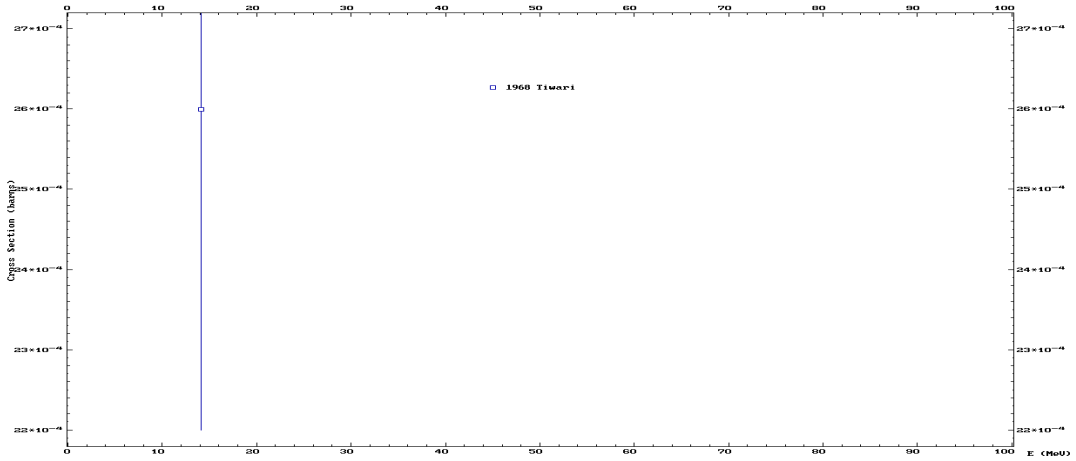


Figura 120. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,D)19-K-43.

[3] 20-Ca-44(n,g)20-Ca-45. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

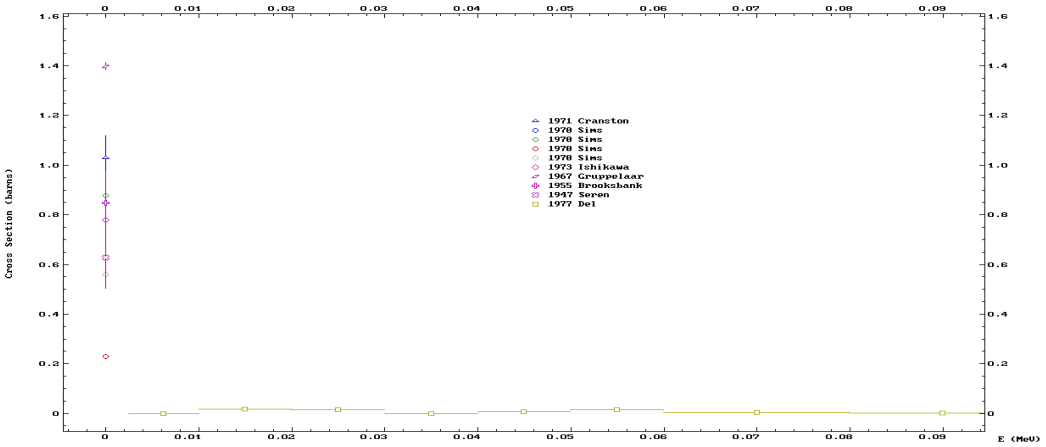


Figura 121. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,g)20-Ca-45.

[4] 20-Ca-44(n,INL)20-Ca-44. Con las siguientes secciones eficaces.

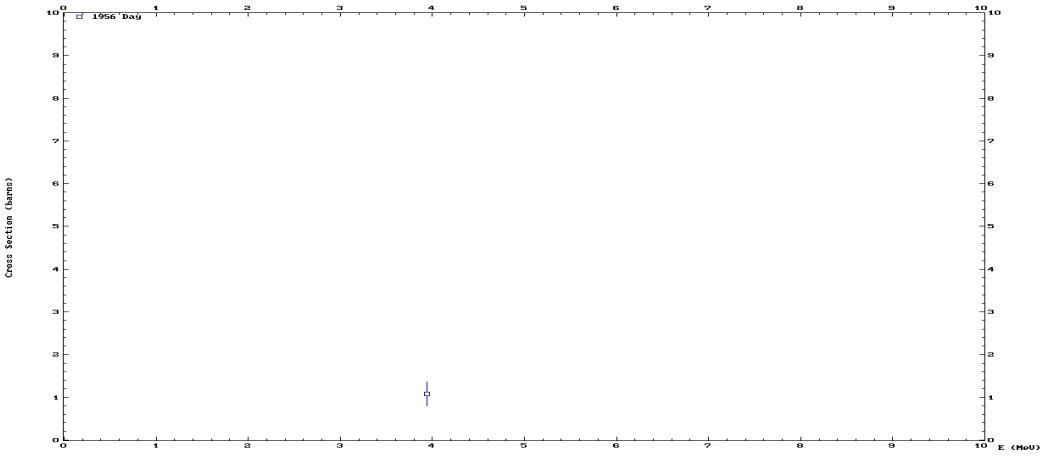


Figura 122. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,INL)20-Ca-44.

[5] 20-Ca-44(n,p)19-K-44. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

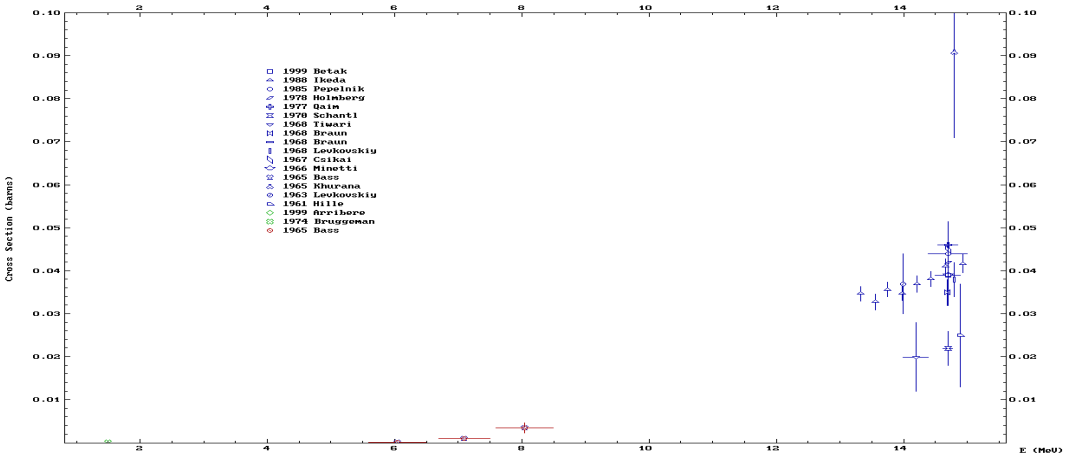


Figura 123. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,p)19-K-44.

[6] 20-Ca-44(n,THS)20-Ca-44. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

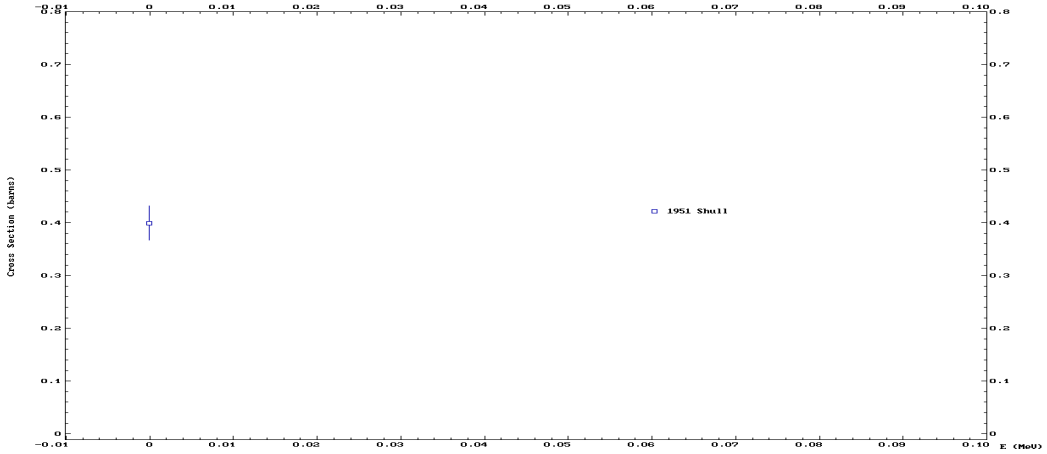


Figura 124. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,THS)20-Ca-44.

[7] 20-Ca-44(n,TOT). La sección eficaz es

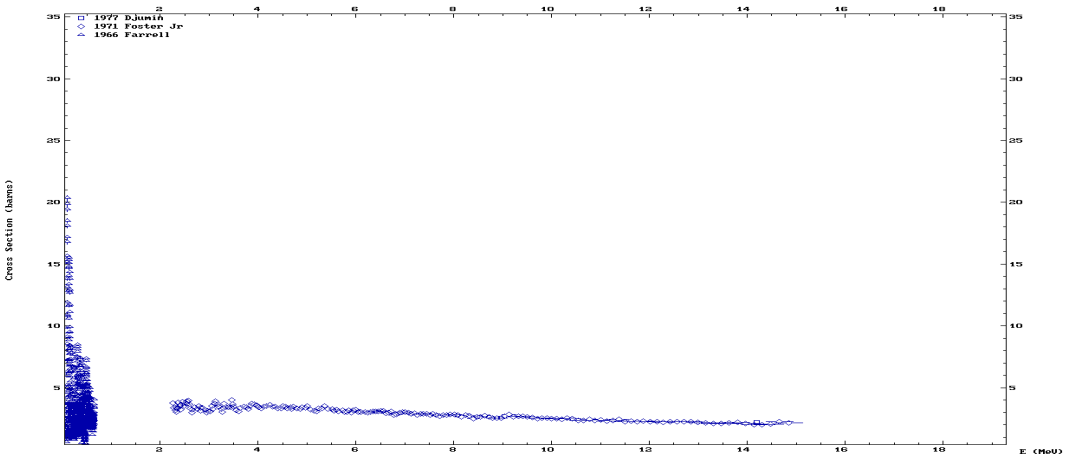


Figura 125. Sección eficaz de la reacción 20-Ca-44(n,TOT).

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del calcio con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
20-Ca-44(n,p)19-K-44	Entre 6 y 8	Menor que 0,004	Escaso interés

Tabla 63. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 44Ca con los neutrones.

Con ello se concluye que no hay reacciones de interés en el rango de energías de los neutrones de una fuente de americio berilio.

5.3.3. Conclusiones de las reacciones del Calcio con los neutrones.

Las reacciones del calcio con los neutrones que tienen interés son las provenientes de la reación con el 40Ca, de las cuales las únicas interesantes son las producidas en la reacción tipo n,p, en la cual se produce 19-K-40. La emisión en el decaimiento de este isótopo se centra en el intervalo de energías en torno a 1460 keV. y tiene una sección eficaz similar a la del flúor.

La energía de esta reacción no interfiere con la energía de la reacción del flúor.

5.4. Estudio del silicio.

Los isótopos del silicio son:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{28}Si	92,21	27,9769	0	--	estable
^{29}Si	4,7	28,9765	1/2	--	estable
^{30}Si	3,09	29,9738	0	--	estable
^{31}Si	0	30,9753	3/2	2,62h	β^-
^{32}Si	0	31,974	0	1,0E02y	β^-

Tabla 64 Isótopos del silicio.

Consideraremos en primer lugar las reacciones de los neutrones con ^{28}Si, para luego pasar a estudiar las reacciones con la ^{29}Si y ^{30}Si.

5.4.1. Reacciones del 28Si con los neutrones.

Las reacciones son las siguientes:

[1] 14-SI-28(n,2n)14-SI-27. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

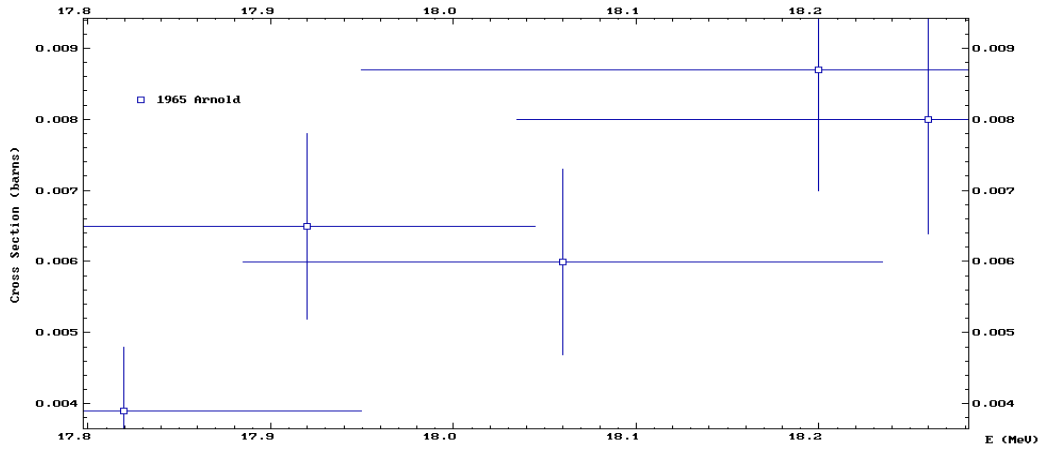


Figura 126. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,2n)14-SI-27

[2] 14-SI-28(N,4-BE-7)10-NE-22 Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

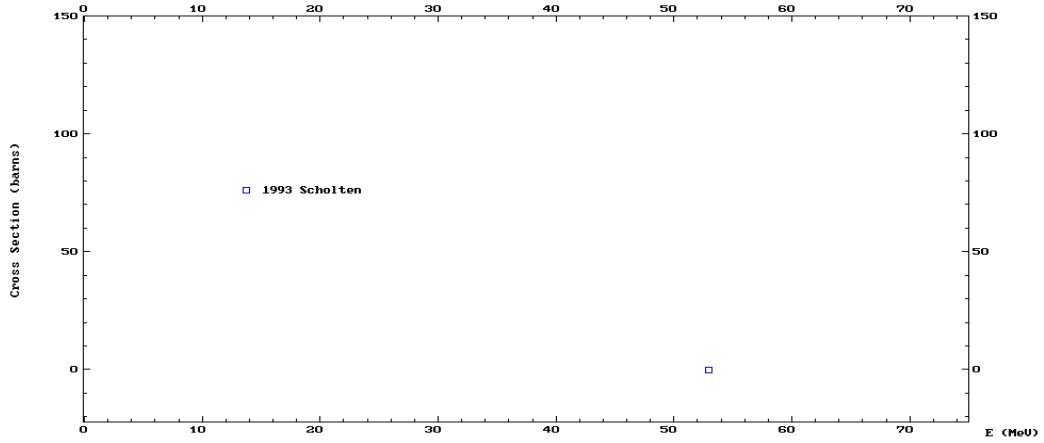


Figura 127. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(N,4-BE-7)10-NE-22

[3] 14-SI-28(n,α)12-MG-25 En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

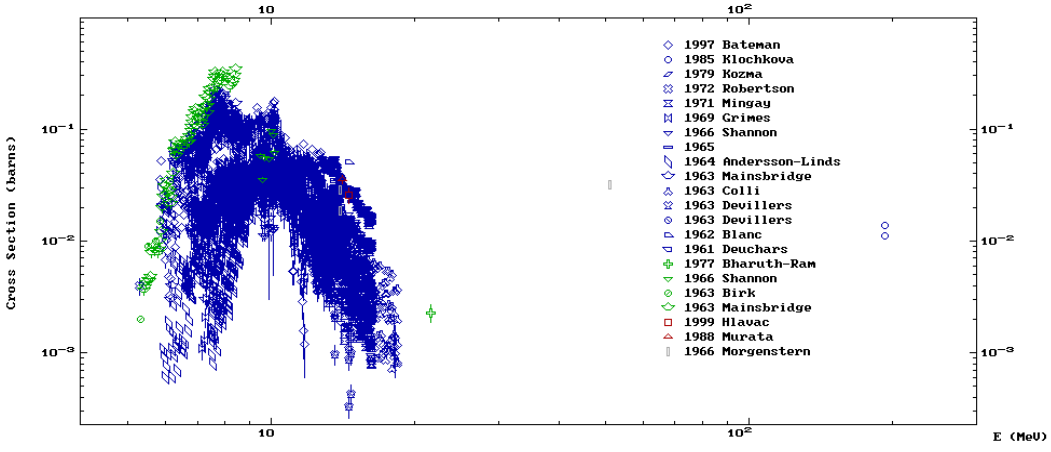


Figura 128. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,α)12-MG-25.

[4] 14-SI-28(n,EL) Con las siguientes secciones eficaces.

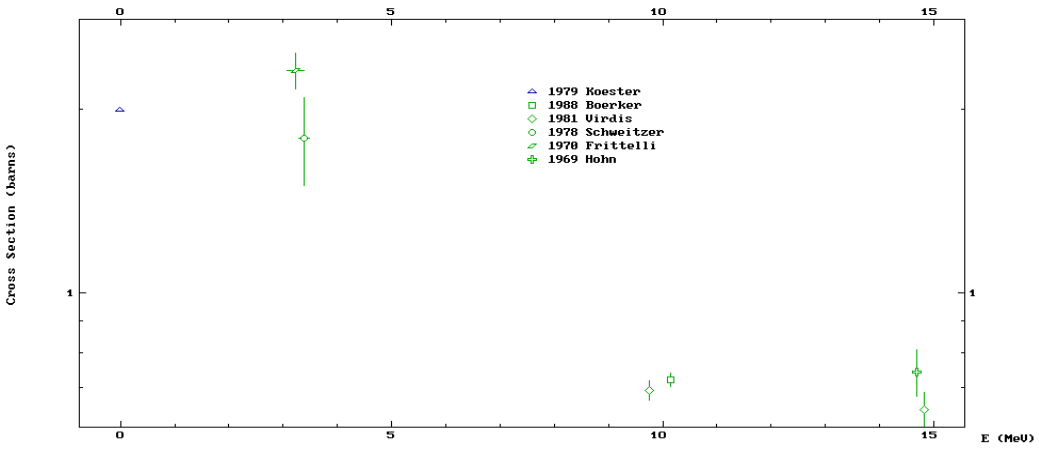


Figura 129. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,EL)

[5] 14-SI-28(n,g)14-SI-29. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

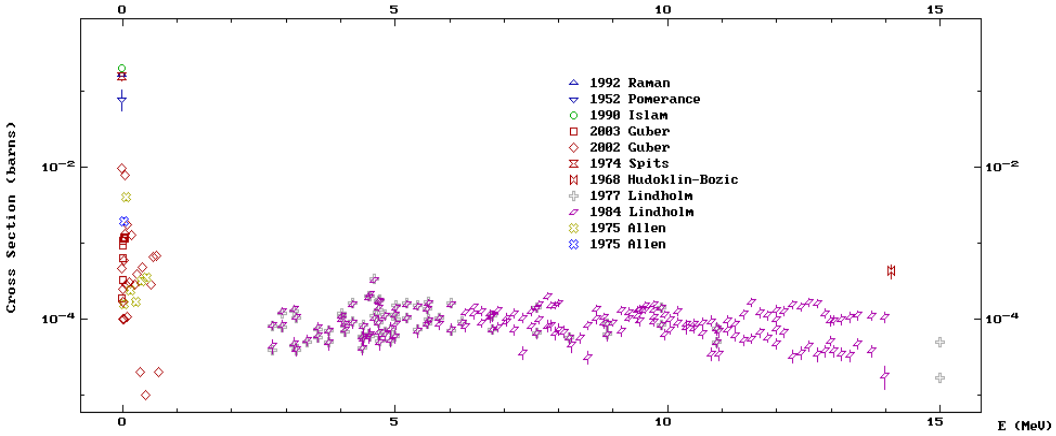


Figura 130. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,g)14-SI-29

[6] 14-SI-28(n,INL)14-SI-28. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

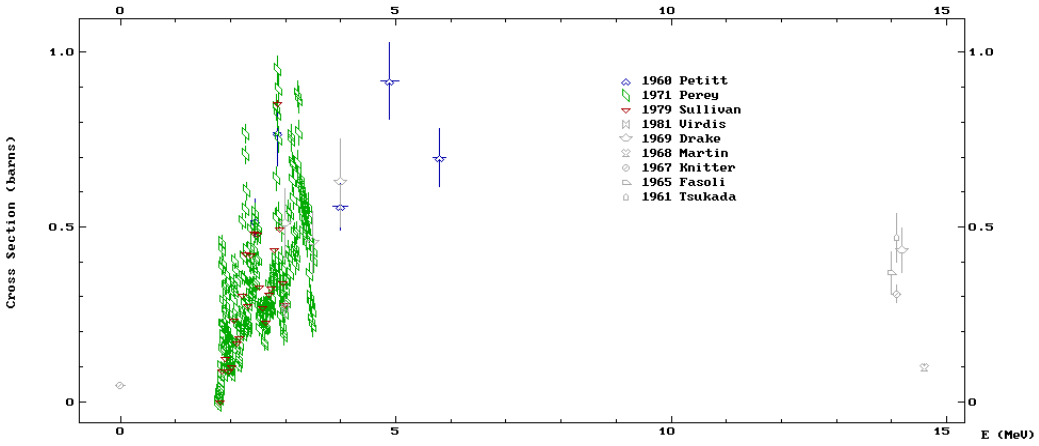


Figura 131. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,INL)14-SI-28

[7] 14-SI-28(n,n+p)13-AL-27. La sección eficaz es

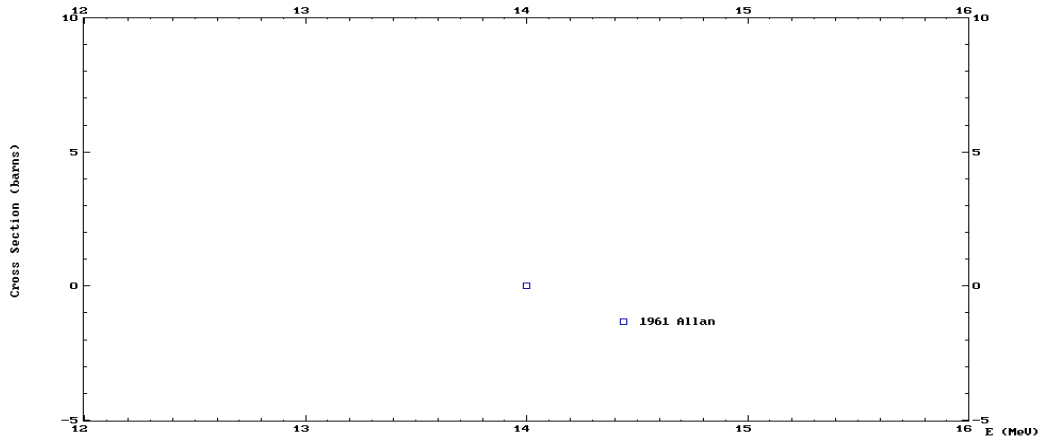


Figura 132. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,n+p)13-AL-27.

[8] 14-SI-28(n,p)13-Al-28. La sección eficaz correspondiente es

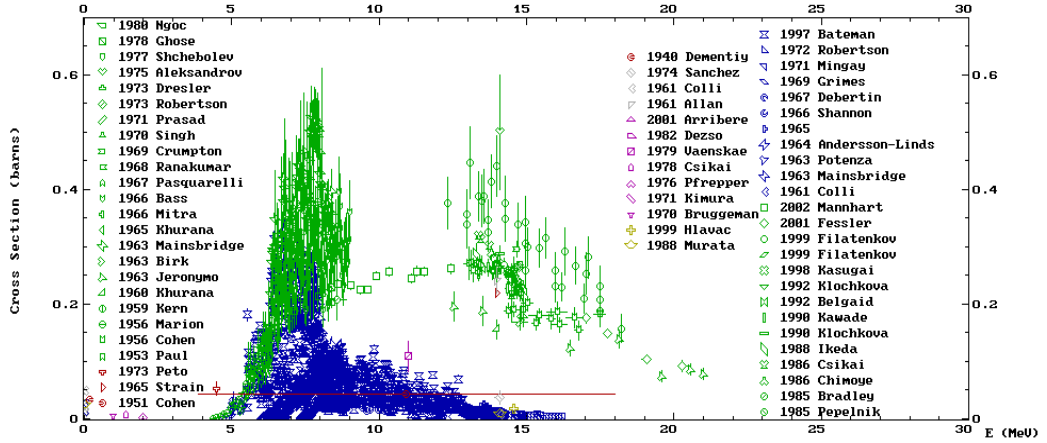


Figura 133. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,p)13-Al-28.

[9] 14-SI-28(n,p+α)11-NA-24. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

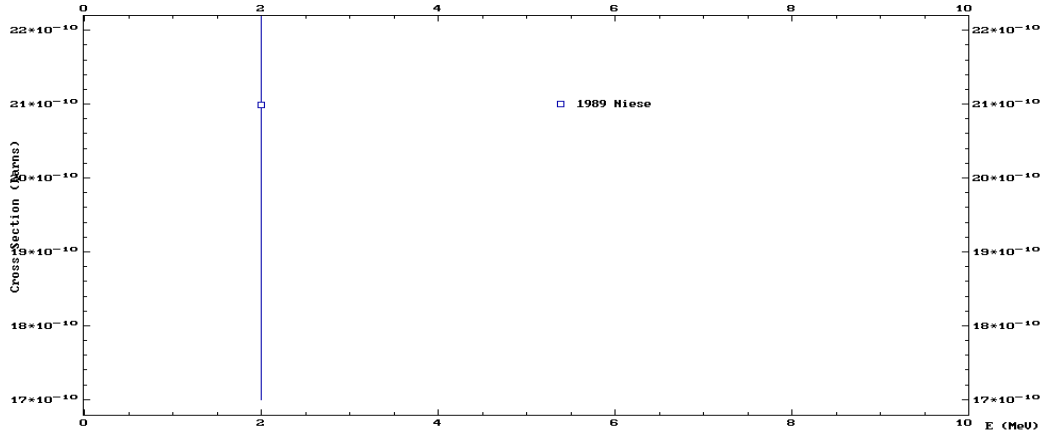


Figura 134. Sección eficaz de la reacción -SI-28(n,p+α)11-NA-24

[10] 14-SI-28(n,TOT). En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

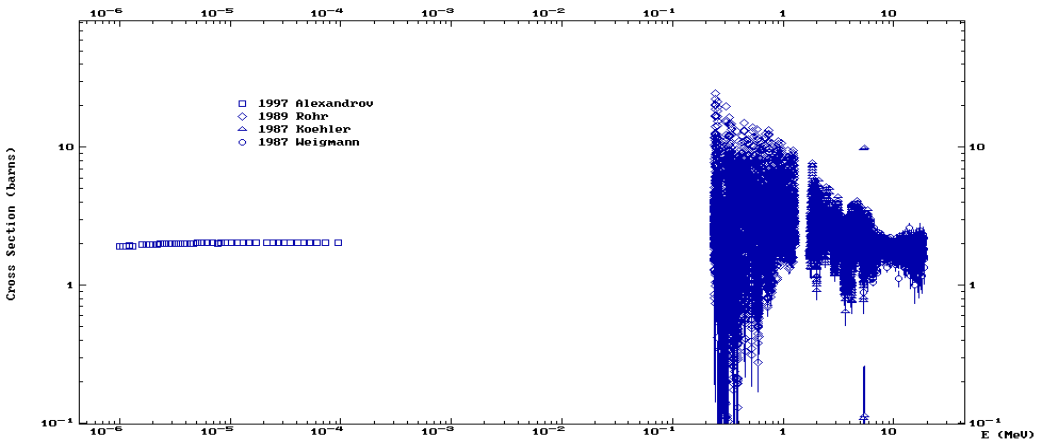


Figura 135. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(n,TOT)

[11] 14-SI-28(N,X)0-G-0. sus secciones eficaces son

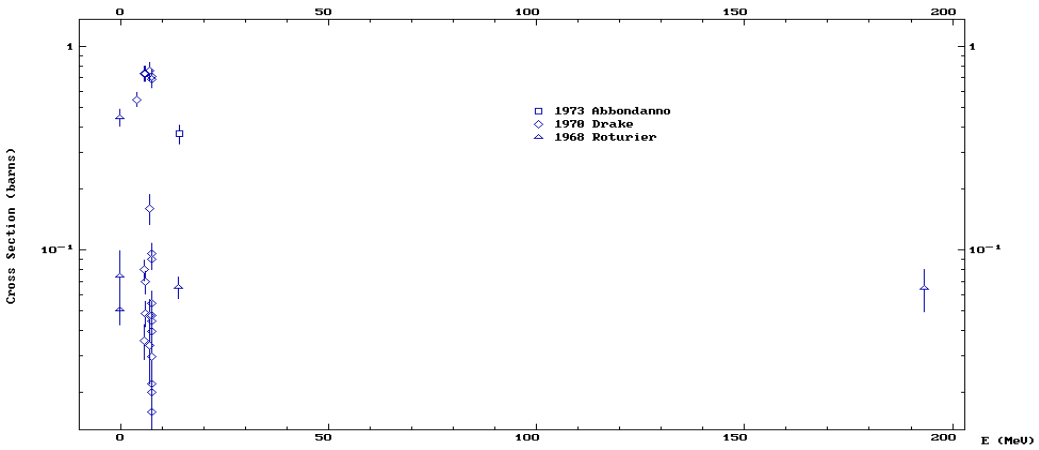


Figura 136. Sección eficaz de la reacción 14-SI-28(N,X)0-G-0.

En resumen:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
14-Si-28 (n,p)13- Al-28	Está en el rango de energías de la fuente	0,3 barns	De interés.
14-SI-28(n,α)12-MG-25	Esta en rango entre 6 y 11 Mev	Rango de secciones entre 1 y 800 mBarn	De interés.
14-SI-28(n,g)14-SI-29	Dentro del rango	Muy bajos valores 10E-4	De interés.

Tabla 65. Resumen de las reacciones del ^{28}Si con los neutrones.

De donde se analizarán las reacciones siguientes:

- 14-Si-28 (n,p)13- Al-28
- 14-SI-28(n,α)12-MG-25
- 14-SI-28(n,g)14-SI-29

5.4.1.1. Reacción 14-Si-28 (n,p)13-Al-28.

El producto de esta reacción tiene un decaimiento:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{28}_{13}Al$	0.0	3+	2,2414 m	β^-	4641,8	$^{28}_{14}Si$

Tabla 66. Características de decaimiento del 13Al28

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1247.2	2862,9	99,990 %	1,2471

Tabla 67. Tabla 68. Energía de la emisión β en el decaimiento del 13Al28

- Emisión Gamma y X:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1778,85	100 %	1,77885

Tabla 69. Energía de la emisión γ en el decaimiento del 13Al28.

5.4.1.2. Reacción 14-SI-28(n,α)12-MG-25.

El producto de esta reacción es estable, por lo que carece de interés para nuestros propósitos.

5.4.1.3. Reacción 14-SI-28(n,g)14-SI-29.

El producto de esta reacción es estable, por lo que no se detectará radiación después de la activación.

5.4.2. Reacciones del 29Si con los neutrones.

[1] 14-Si29(N,2P)12-Mg-28. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

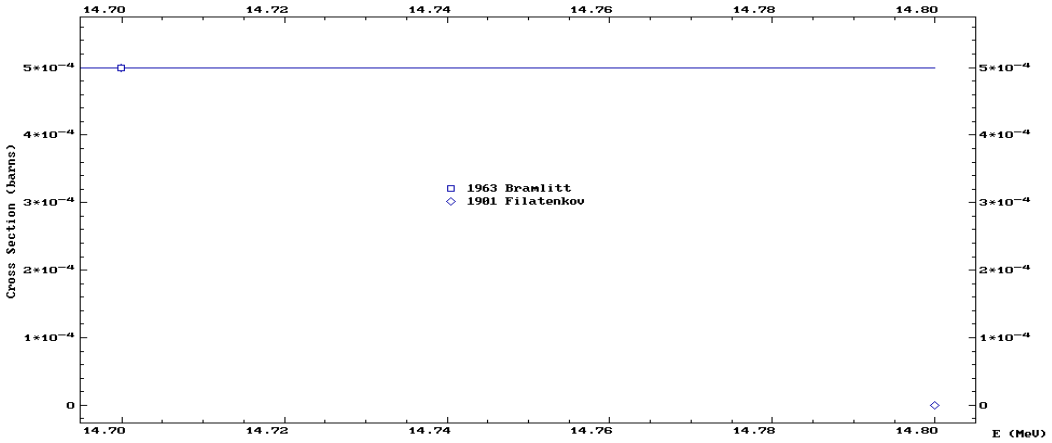


Figura 137. Sección eficaz de la reacción 14-Si29(N,2P)12-Mg-28.

[2] 14-SI-29(n,α)12-MG-26. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

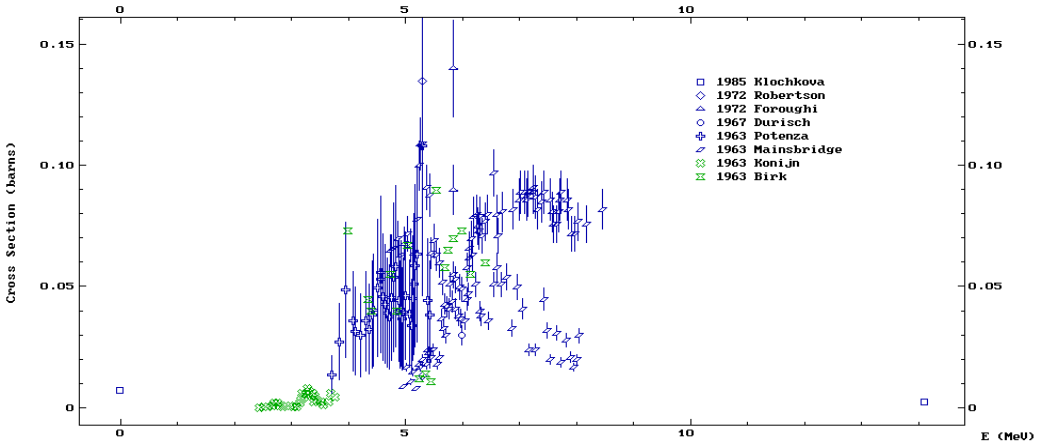


Figura 138. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,α)12-MG-26.

El magnesio 26 es estable.

[3] 14-SI-29(n,EL). En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

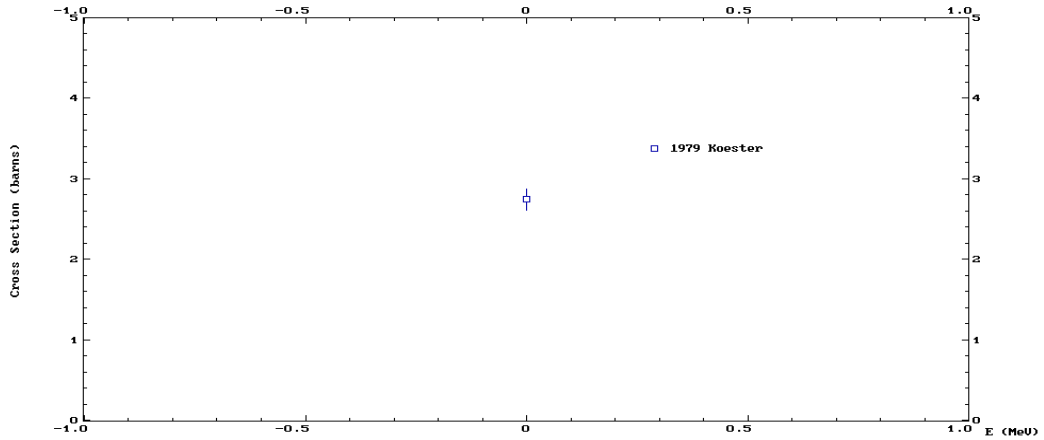


Figura 139. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,EL).

[4] 14-SI-29(n,g)14-SI-30. Con las siguientes secciones eficaces.

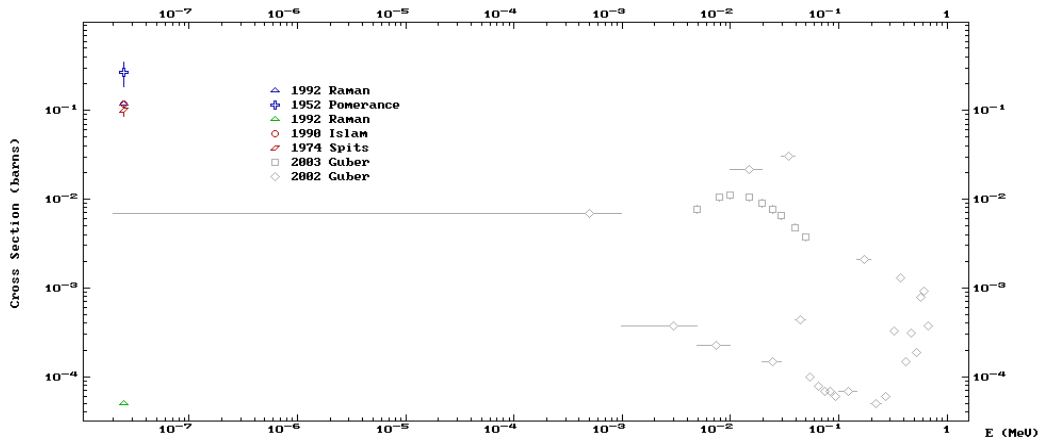


Figura 140. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,g)14-SI-30.

[5] 14-SI-29(n,INL)14-SI-29. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

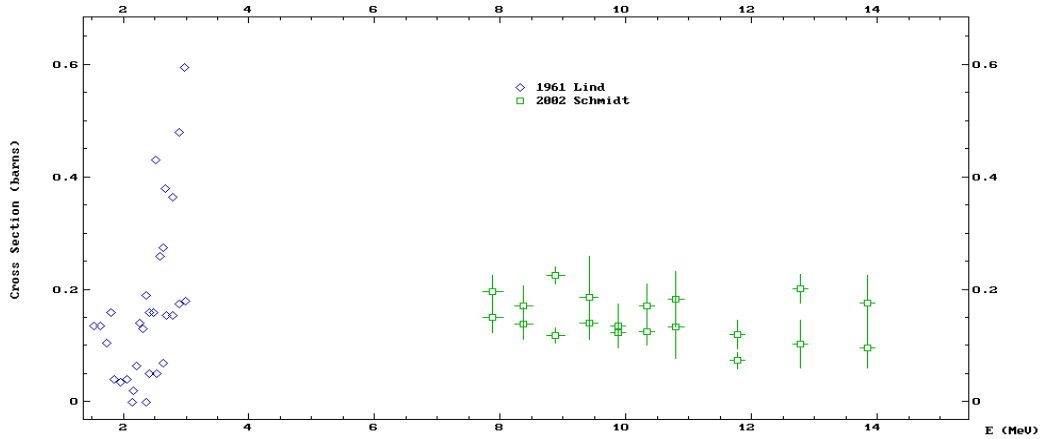


Figura 141. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,INL)14-SI-29

[6] 14-SI-29(n,n+p)13-AL-28. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

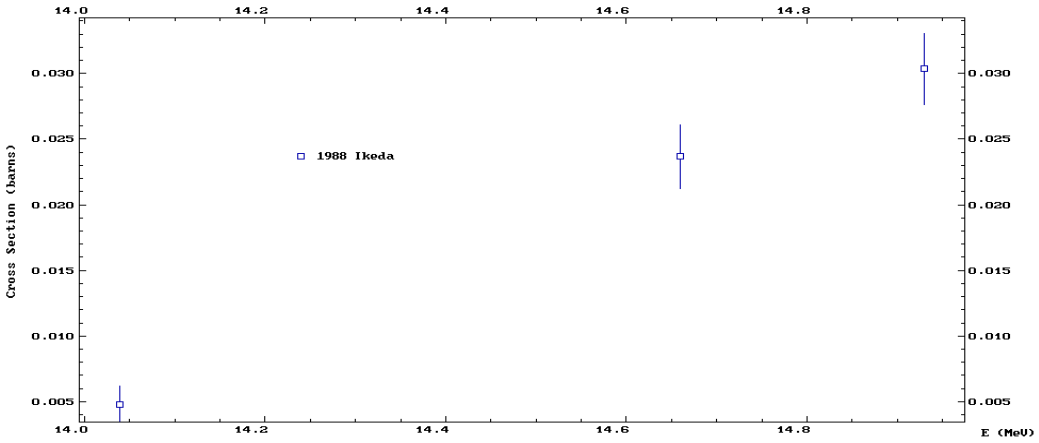


Figura 142. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,n+p)13-AL-28.

[7] 14-SI-29(n,p)13-AL-29. La sección eficaz es

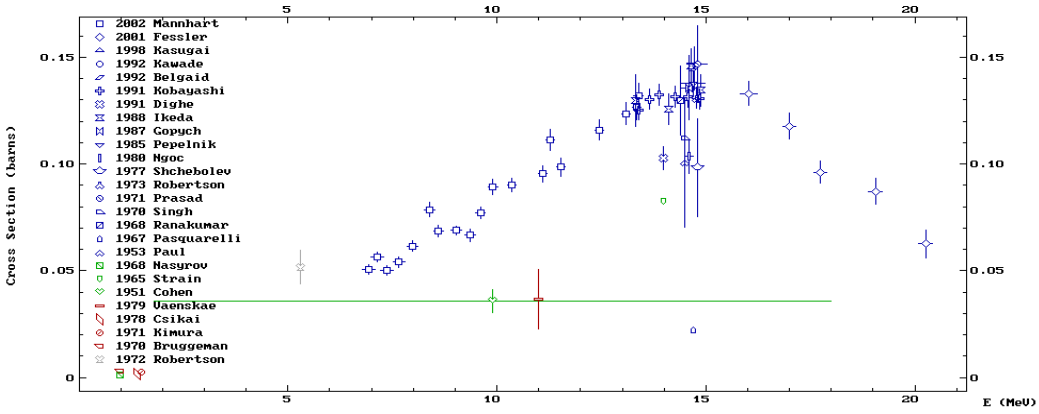


Figura 143. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(n,p)13-AL-29

[8] 14-SI-29(N,X)13-AL-28 La sección eficaz correspondiente es

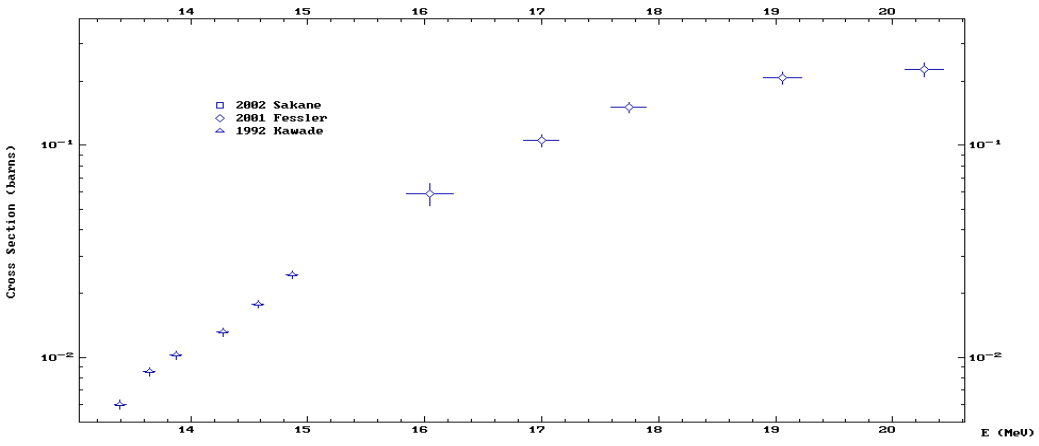


Figura 144. Sección eficaz de la reacción 14-SI-29(N,X)13-AL-28

En resumen:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
14-SI-29(n,α)12-MG-26	En el rango	0,05	De interés
14-SI-29(n,p)13-AL-29	En el rango	0,06	De interés

Tabla 70. Resumen de las reacciones de interés de 29Si.

Que se analizan a continuación.

5.4.2.1. Reacción 14-SI-29(n,α)12-MG-26.

El producto de esta reacción es estable, luego carece de interés.

5.4.2.2. Reacción 14-SI-29(n,p)13-AL-29.

El decaimiento del Aluminio se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{29}_{13}$Al	0	5/2+	6.56 m	β^-: 100 %	3679.6	$^{29}_{14}$Si

Tabla 71. Características de decaimiento del 13Al29

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
215,7	612,6	0,033 %	7,1E-5
490,1	1254,0	6,30 %	0,0309
670,4	1651,4	3,80 %	0,025
1023,7	2406,3	89,9 %	0,920

Tabla 72. Energía de la emisión β del 13Al29.

- Emisión Gamma y X.

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
397,86	0,026 %	1,0E-4
754,74	0,230 %	0,00174
1038,86	0,0050 %	5,2E-5
1152,593	0,88 %	0,0101
1273,368	90,6 %	1,154
1793,57	0,022 %	3,9E-4
2028,07	3,70 %	0,075
2425,906	5,7 %	0,138

Tabla 73. Energía de la emisión γ del 13Al29..

5.4.3. Reacciones del ^{30}Si con los neutrones.

El decaimiento del Aluminio se lleva a cabo a través de:

[1] 14-Si-30(n,α)12-Mg-27. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

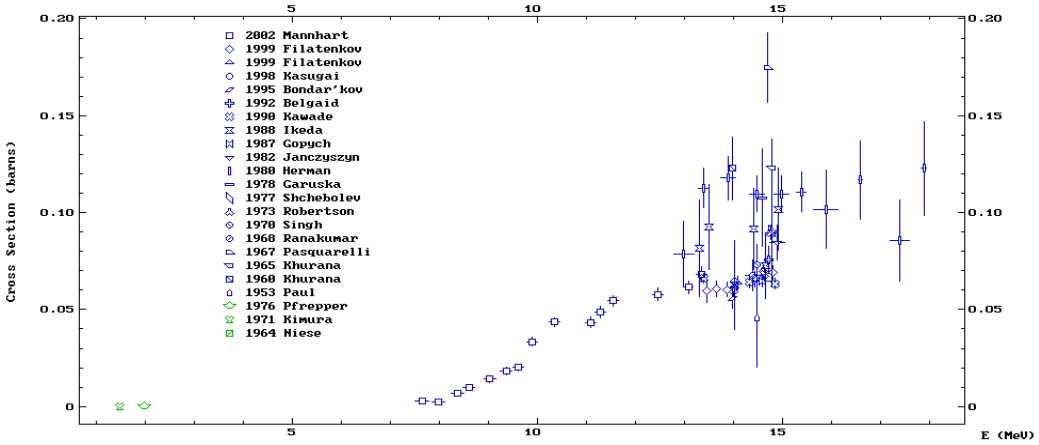


Figura 145. Sección eficaz de la reacción 14-Si-30(n,α)12-Mg-27

[2] 14-SI-30(n,EL)14-SI-30 Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

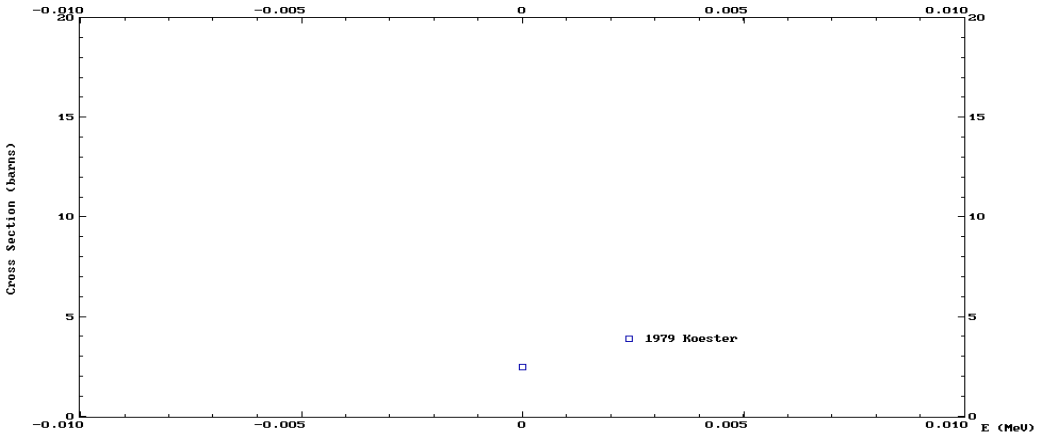


Figura 146. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,EL)14-SI-30

[3] 14-SI-30(n,g)14-SI-31. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

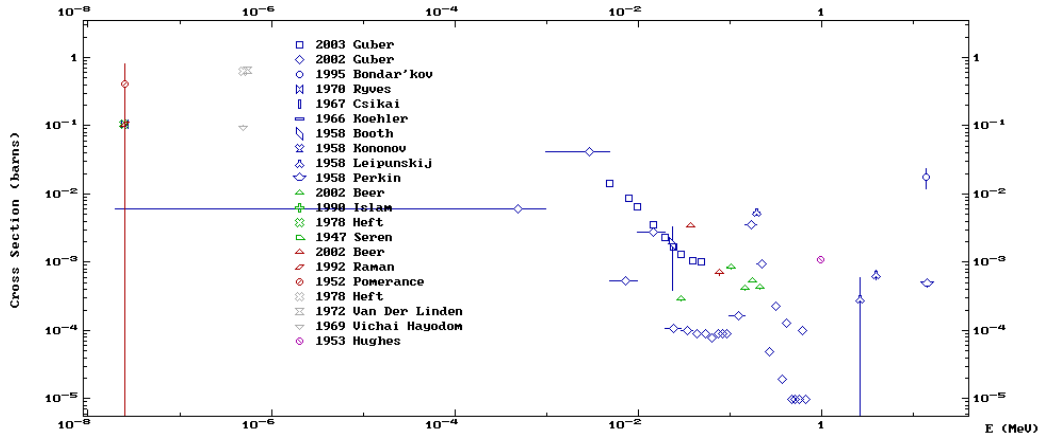


Figura 147. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,g)14-SI-31

[4] 14-SI-30(n,INL)14-SI-30. Con las siguientes secciones eficaces.

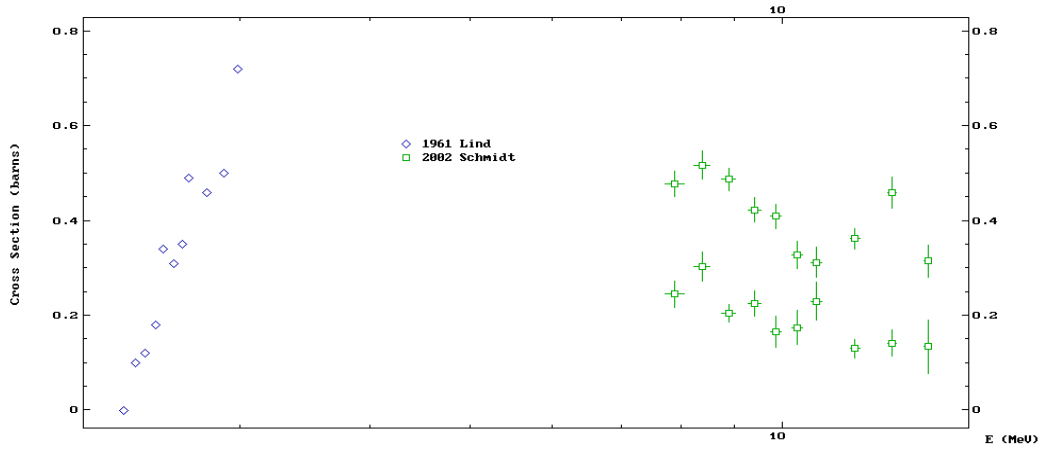


Figura 148. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,INL)14-SI-30

[5] 14-SI-30(n,n+p)13-AL-29. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

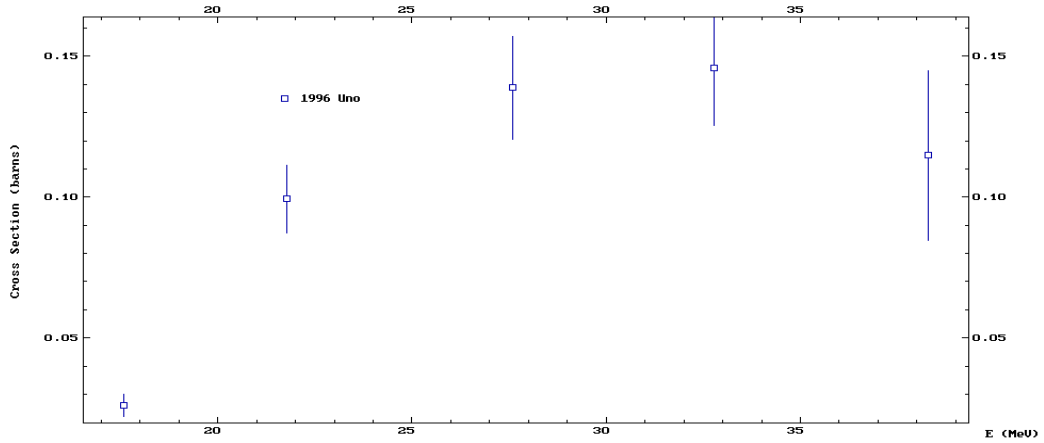


Figura 149. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,n+p)13-AL-29.

[6] 14-SI-30(n,p)13-AL-30. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

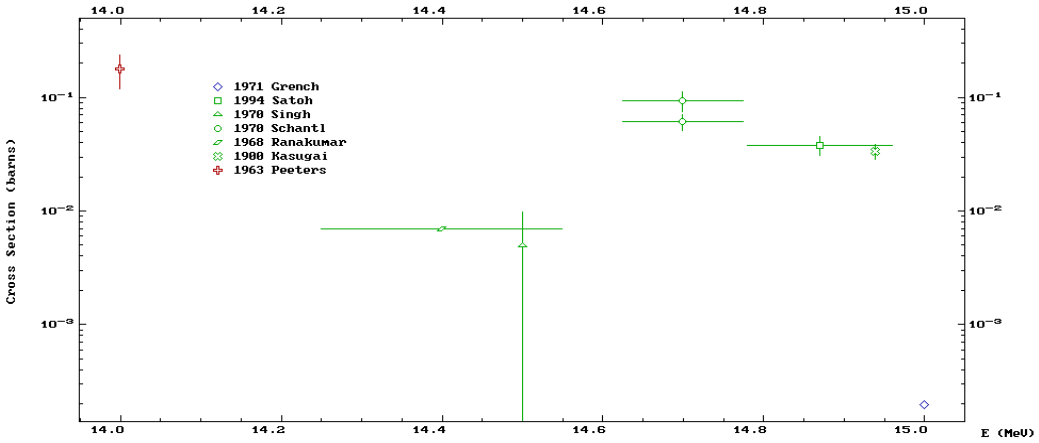


Figura 150. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,p)13-AL-30

[7] 14-SI-30(n,TOT),, La sección eficaz es

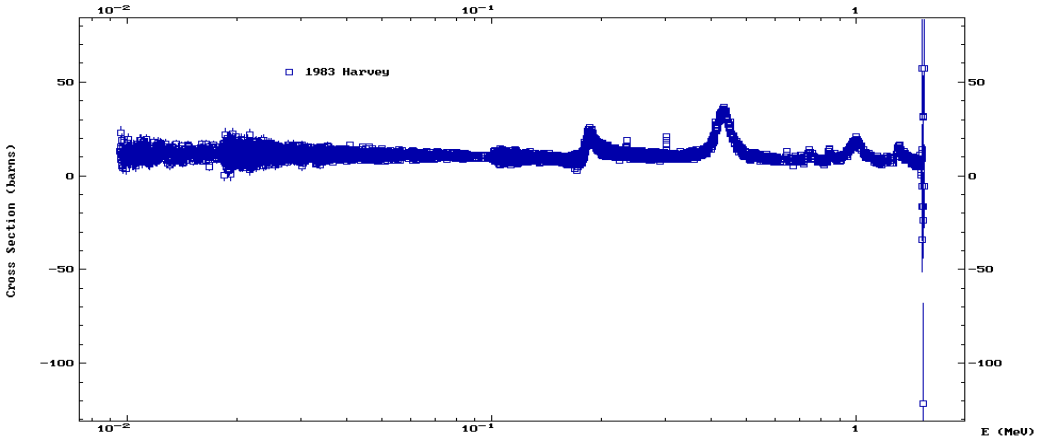


Figura 151. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(n,THS)14-SI-30

[8] 14-SI-30(N,X)13-AL-29. La sección eficaz correspondiente es

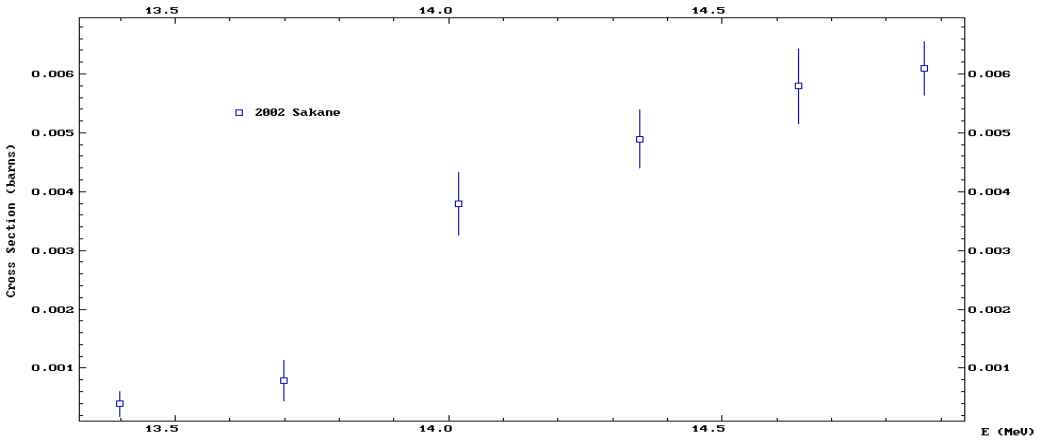


Figura 152. Sección eficaz de la reacción 14-SI-30(N,X)13-AL-29.

En resumen:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
14-Si-30(n,α)12-Mg-27	Parte en el rango	0,02 en la zona del rango	De interés aunque la sección eficaz es pequeña

Que se analizan a continuación.

5.4.3.1. Reacción 14-Si-30(n,α)12-Mg-27.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{27}_{12}$Mg	0,0	1/2+	9,458 m	β^-: 100 %	2610,6	$^{27}_{13}$Al

Tabla 74. Características de decaimiento del 12Mg27.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
645.7	1596.1	29.0 %	0.187
724.2	1766.8	71.0 %	0.514

Tabla 75. Energía de la emisión β del 12Mg27.

- Emisión Gamma y X.

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
170.686	0.80 %	0.00137
843.76 *3*	71.8 %	0.606
1014.44	28.0 %	0.284

Tabla 76. Energía de la emisión γ del 12Mg27..

5.4.4. Conclusiones de las reacciones de la Sílice con los neutrones.

Existen tres formas de Si en la naturaleza y sus reacciones con los neutrones producen:

- La única reacción interesante del 28Si, el componente mayoritario del silicio natural, en el rango de energías de neutrones caracterísitico de una fuente de americio berilio, produce 13Al28. La sección eficaz de esta reacción es comparable con la reacción n,α del flúor, pero la energía de

decaimiento es notablemente inferior, 1778 keV, con un $T_{1/2}$ de 2,24 minutos, considerablemente mayor que el del 16N.

- La 29Si y la 30Si, que son minoritarios en la naturaleza, tienen una sección eficaz del orden de 0,06 y 0,02 barns y producen 13Al29 y 12Mg27 cuyas energías de la radiación γ emitida, son 1273 y 843 keV con tiempos de decaimiento de mas de 6,5 minutos.

Por todo ello, la sílice no interfiere ni en energía de radiación gamma, ni en tiempos de decaimiento en el análisis de la emisión del 16N procedente de la reacción n,α del flúor.

5.5. Estudio del S.

Los isótopos son los siguientes:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{32}S	95.02	31.9721	0	--	estable
^{33}S	0.76	32.9714	3/2	--	estable
^{34}S	4.22	33.9679	0	--	estable
^{35}S	0	34.969	3/2	87.2d	β^-
^{36}S	0.014	35.9671	0	--	estable

Tabla 77. Isótopos del S.

5.5.1. Reacciones del 32S con los neutrones.

[1] 16-S-32(n,2n)16-S-31. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

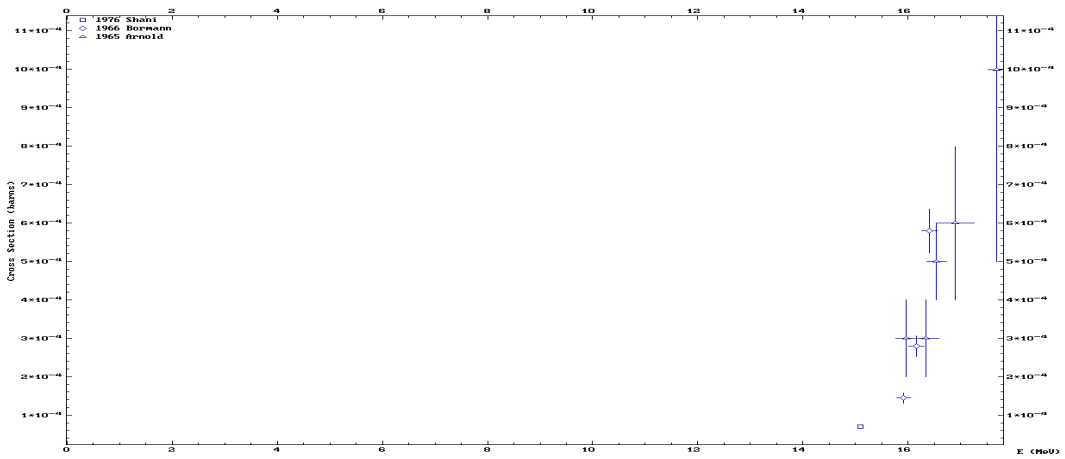


Figura 153. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,2n)16-S-31.

[2] 16-S-32(n,α)14-Si-29. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

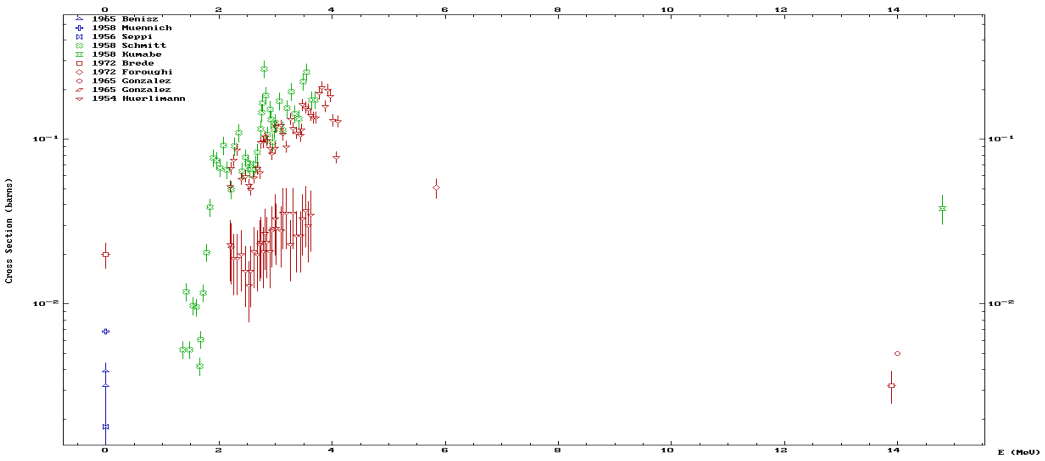


Figura 154. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,α)14-Si-29

[3] 16-S-32(n,EL)16-S-32. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

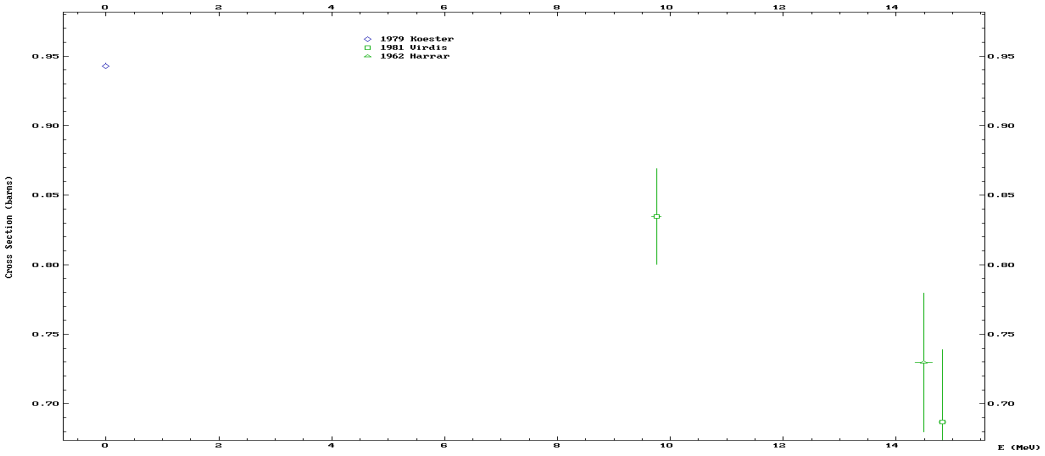


Figura 155. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,EL)16-S-32

[4] 16-S-32(n,T)15-P-30. Con las siguientes secciones eficaces.

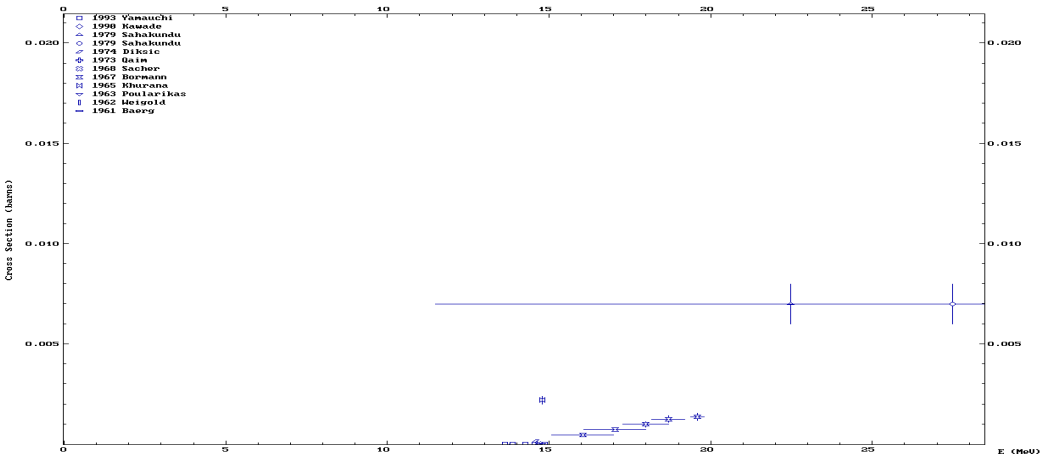


Figura 156. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,T)15-P-30

[5] 16-S-32(n,TOT). Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

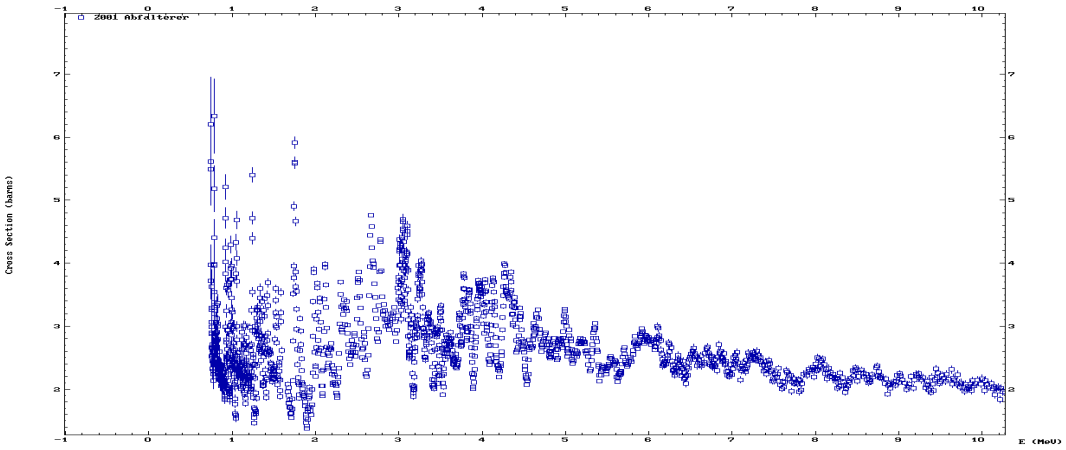


Figura 157. Sección eficaz de la reacción 16-S-32(n,TOT)

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 32Si con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
16-S-32(n,α)14-Si-29	Menor que 6 MeV	Desde 0,01 hasta 0,4	De interés

Tabla 78. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 32Si con los neutrones.

5.5.1.1. Reacción 16-S-32(n,α)14-Si-29.

El elemento producido en esta reacción es estable y no interfiere en la lectura.

5.5.2. Reacciones del 34 S con los neutrones.

[1] 16-S-34(n,α)14-Si-31. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

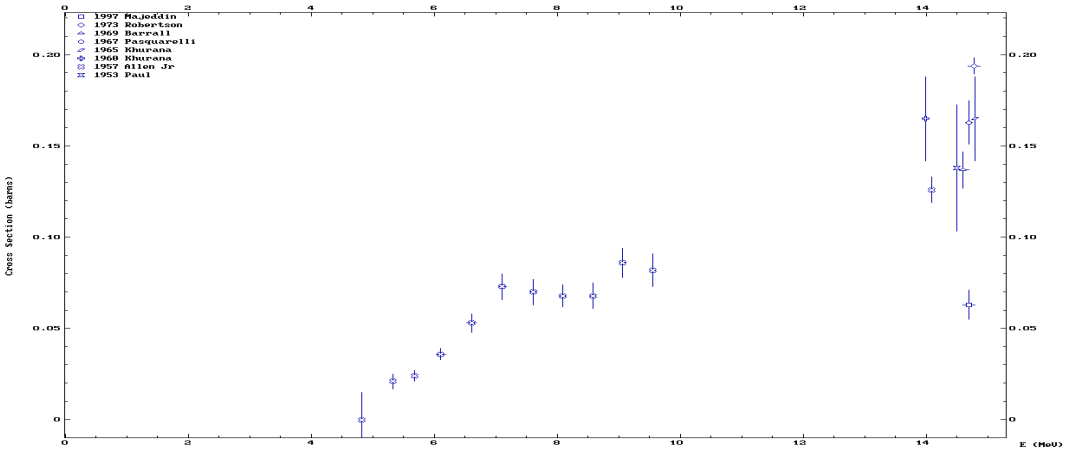


Figura 158. Sección eficaz de la reacción 16-S-34(n,α)14-Si-31

[2] 16-S-34(n,EL)16-S-43. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

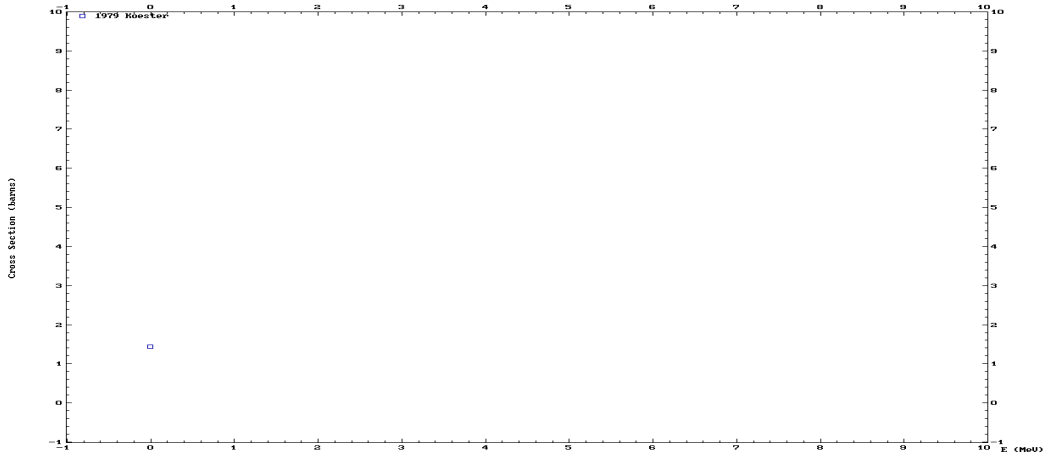


Figura 159. Sección eficaz de la reacción 16-S-34(n,EL)16-S-43

[3] 16-S-34(n,g)16-S-35. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

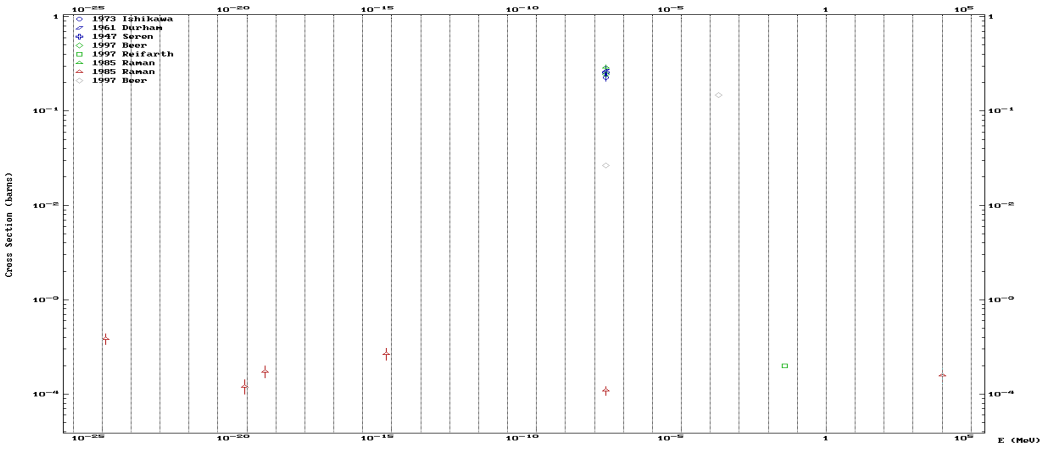


Figura 160. Sección eficaz de la reacción 16-S-34(n,g)16-S-35

[4] 16-S-33(n,p)15-P-33. Con las siguientes secciones eficaces.

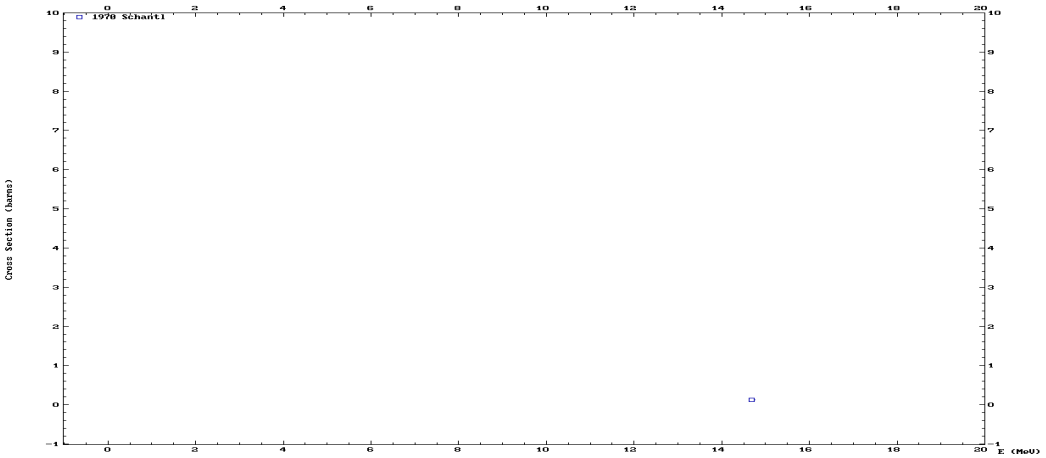


Figura 161. Sección eficaz de la reacción 16-S-33(n,p)15-P-33

[5] 16-S-34(n,p)15-P-34. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

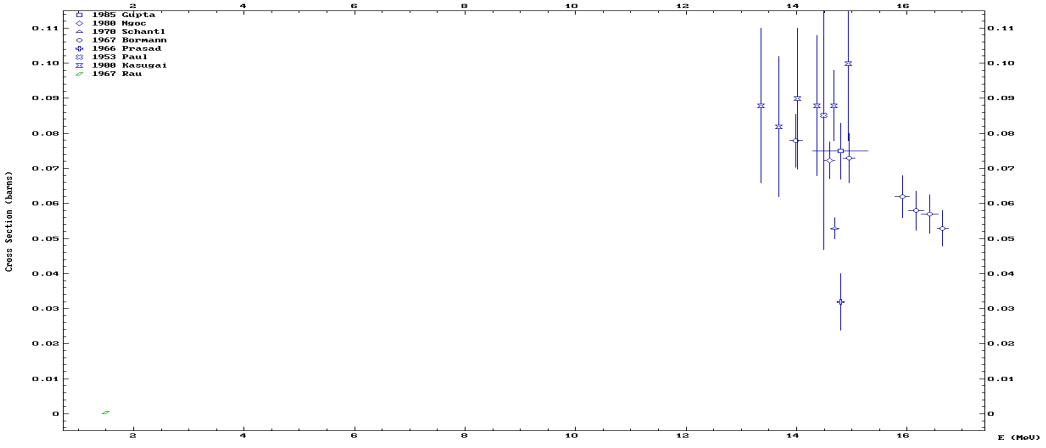


Figura 162. Sección eficaz de la reacción 16-S-33(n,p)15-P-33

[6] . 16-S-34(n,TOT). Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

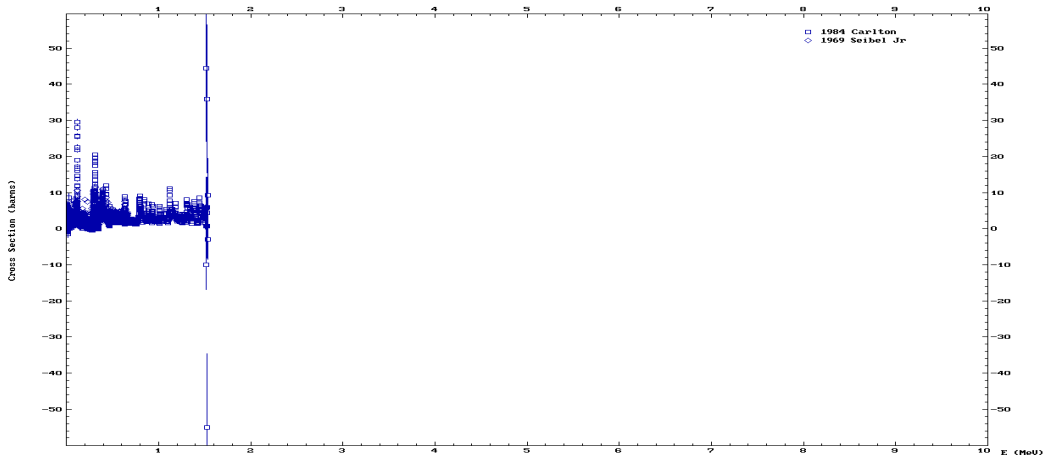


Figura 163. Sección eficaz de la reacción 16-S-33(n,p)15-P-33

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 34Si con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
16-S-34(n,α)14-Si-31	Entre 4,5 y 10 MeV	Menor que 0,1	De interés

Tabla 79. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 34Si con los neutrones.

5.5.2.1. Reacción 16-S-34(n,α)14-Si-31.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jn padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{31}_{14}Si$	0	3/2+	157.3 m	β^-: 100 %	1490.5	$^{31}_{15}P$

Tabla 80. Características de decaimiento del 14-Si-31.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
68.7	224.3	0.07 %	4.809E-5
595.6	1490.5	99.93 %	0.5952

Tabla 81. Energía de la emisión β del 14-Si-31

- Emisión γ y X

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1266.15	0.07 %	8.8631E-4

Tabla 82. Energía de la emisión γ y Xdel 14-Si-31

5.5.3. Conclusiones de las reacciones del Azufre con los neutrones.

Las reacciones de interés en la activación neutrónica de una muestra de fluorita en relación con el azufre, provienen de la activación del 16S34 y emiten una radiación gamma con una energía considerablemente menor que la del flúor, por lo que no es de esperar que provoquen interferencias.

5.6. Estudio del Ba.

Sus isótopos son:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{130}Ba	0,101	129,906	0	--	estable
^{131}Ba	0	131	1/2	11.7d	EC,β^+
^{132}Ba	0,097	131,905	0	--	estable
^{133}Ba	0	133	1/2	10.53y	EC
^{133}Bam	0	133	11/2	1.621d	IT,EC
^{134}Ba	2,42	133,905	0	--	estable
^{135}Ba	6,59	134,906	3/2	--	estable
^{135}Bam	0	135	11/2	1.20d	IT
^{136}Ba	7,81	135,905	0	--	estable
^{137}Ba	11,32	137,906	3/2	--	estable
^{137}Bam	0	137	11/2	2.552m	IT
^{138}Ba	71,66	137,905	0	--	estable
^{139}Ba	0	139	7/2	1.396h	β^-
^{140}Ba	0	140	0	12.75d	β^-
^{141}Ba	0	141	3/2	18.3m	β^-
^{142}Ba	0	142	0	10.7m	β^-

Tabla 83. Isótopos del Ba.

5.6.1. Reacciones del 134Ba con los neutrones.

[1] 56-Ba-134(n,2n)56-Ba-133-M. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

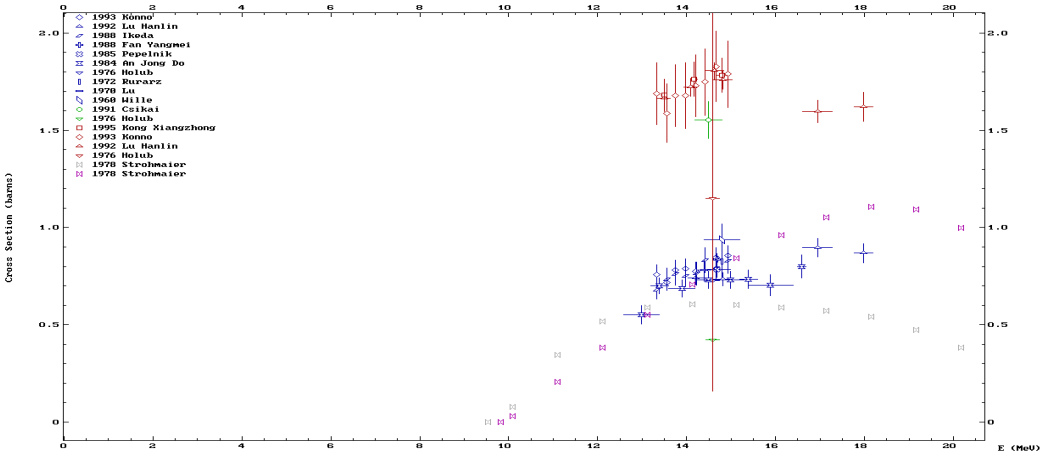


Figura 164. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,2n)56-Ba-133-M

[2] 56-Ba-134(n,3n)56-Ba-132. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

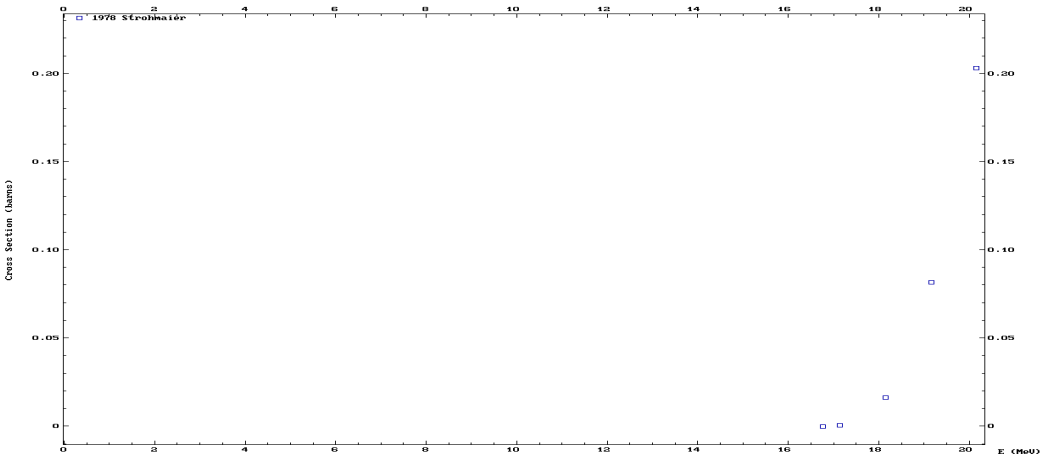


Figura 165. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,3n)56-Ba-132

[3] 56-Ba-134(n,α)54-Xe-131-M. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

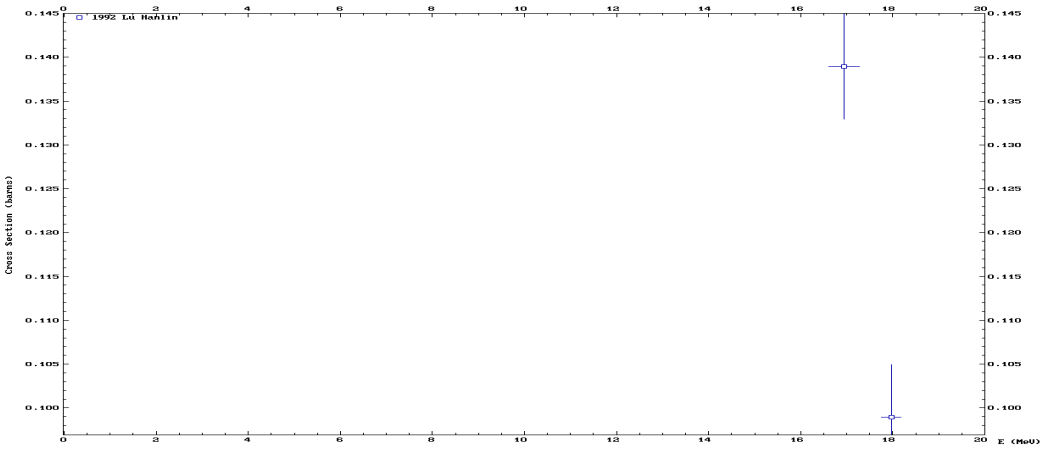


Figura 166. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,α)54-Xe-131-M

[4] 56-Ba-134(n,non). Con las siguientes secciones eficaces.

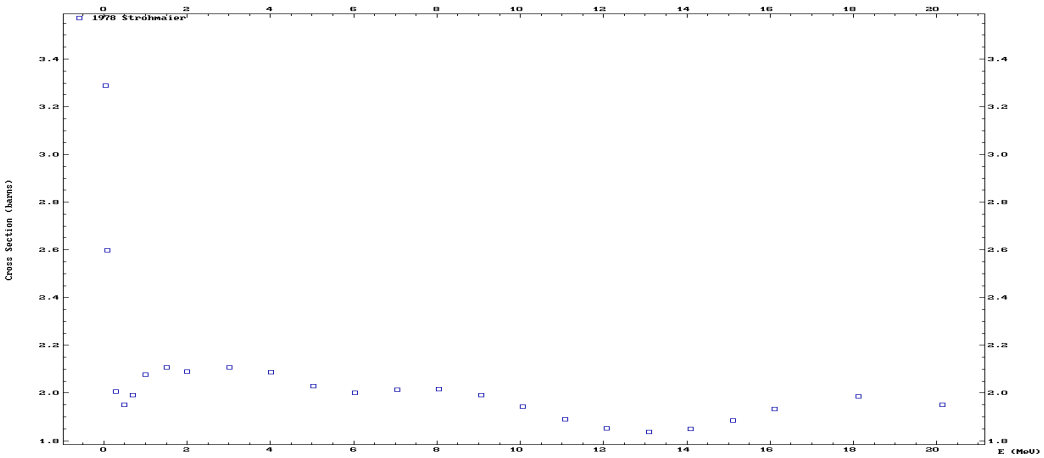


Figura 167. Sección eficaz de la reacción

[5] 56-Ba-134(n,g)56-Ba-135. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

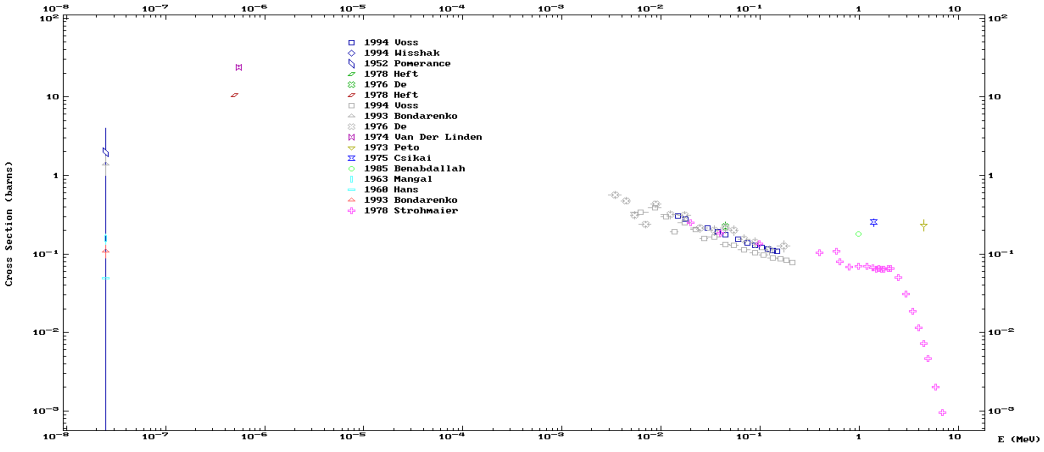


Figura 168. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,g)56-Ba-135

[6] 56-Ba-134(n,g+X). Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

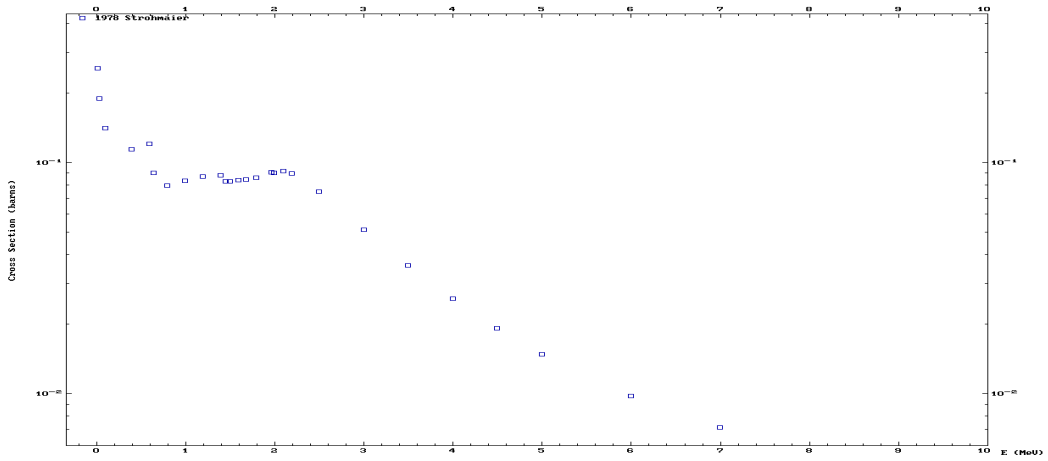


Figura 169. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,g+X)

[7] 56-Ba-134(n,INL)56-Ba-134. La sección eficaz es

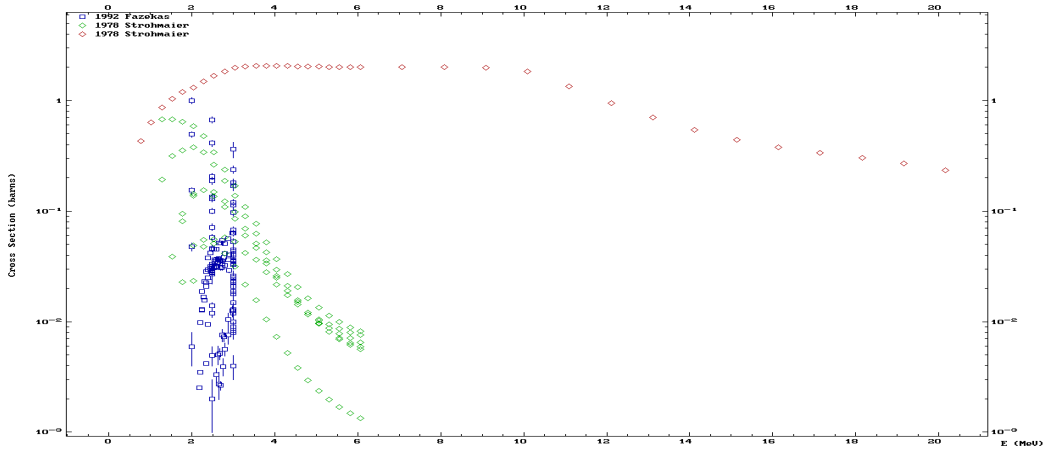


Figura 170. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,INL)56-Ba-134

[8] 56-Ba-134(n,T)56-Cs-132. La sección eficaz correspondiente es

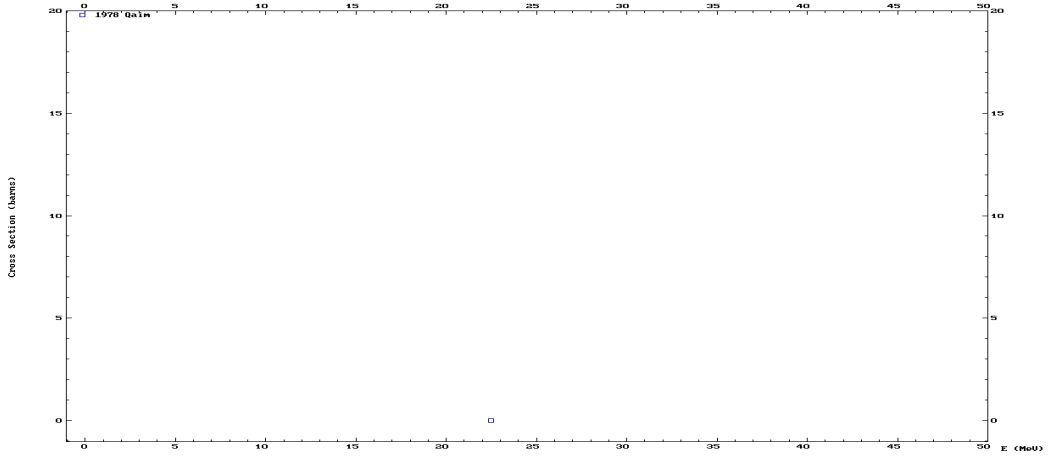


Figura 171. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,T)56-Cs-132

[9] 56-Ba-134(n,n+p)55-Cs-133. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

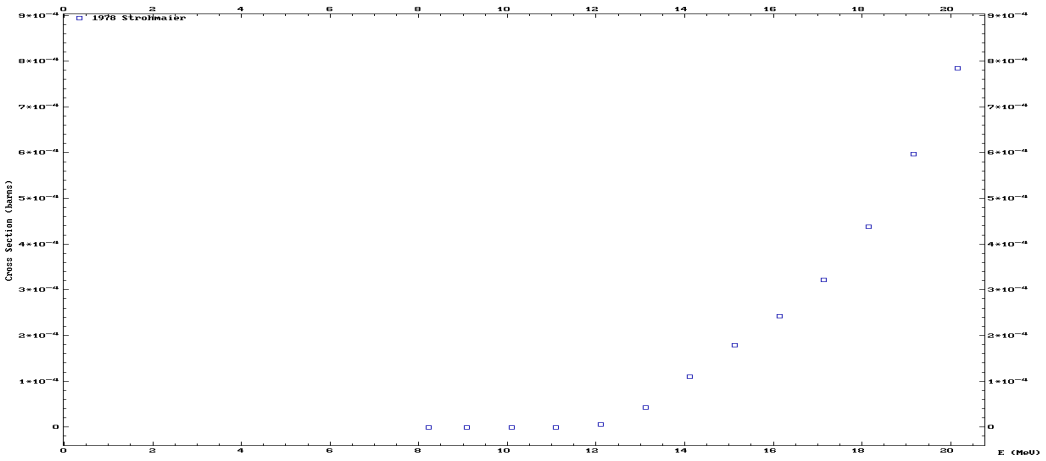


Figura 172. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,n+p)55-Cs-133

[10] 56-Ba-134(n,non). En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

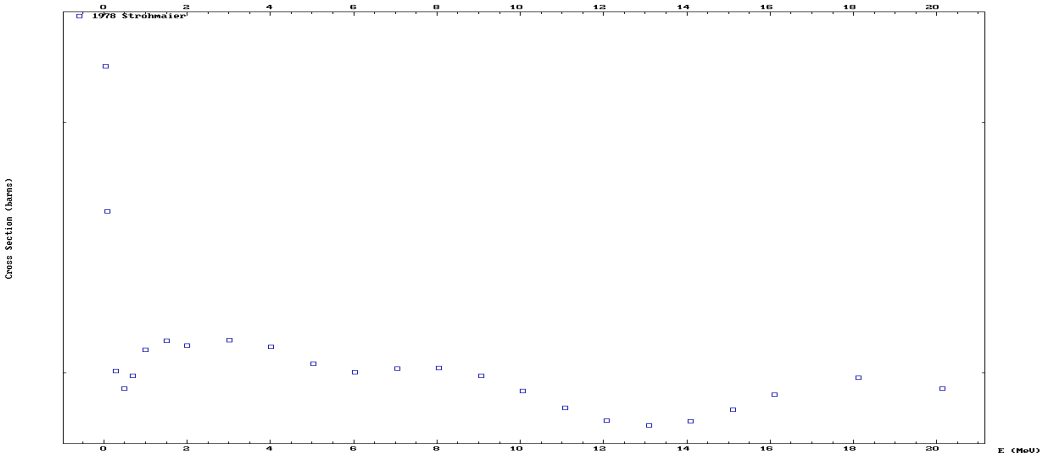


Figura 173. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,non)

[11] 56-Ba-134(n,p)55-Cs-134-G. sus secciones eficaces son

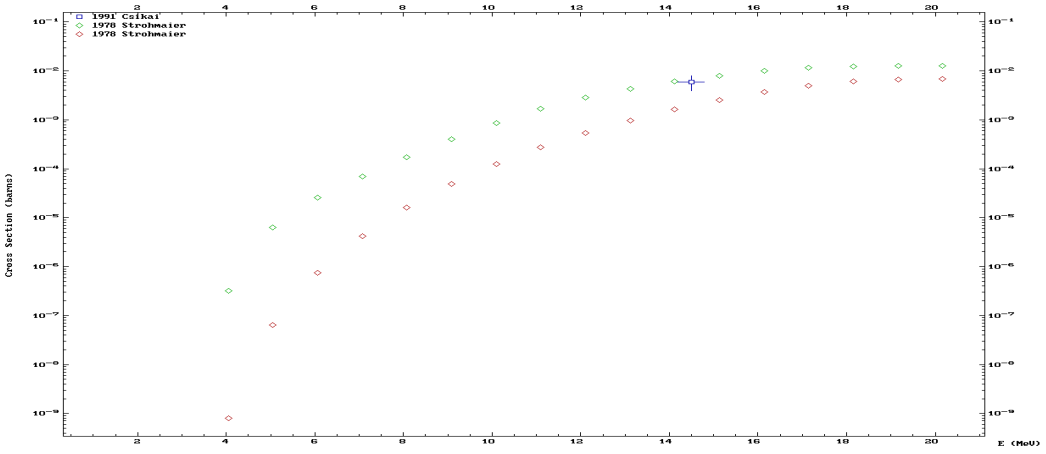


Figura 174. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,p)55-Cs-134-G

[12] 56-Ba-134(n,p+n)55-Cs-133. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

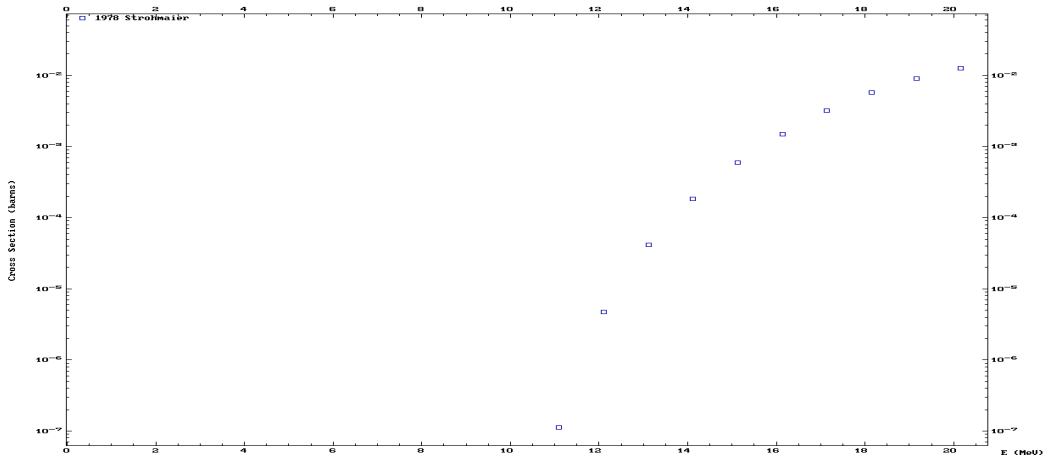


Figura 175. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,p+n)55-Cs-133

[13] 56-Ba-134(n,p+X). . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

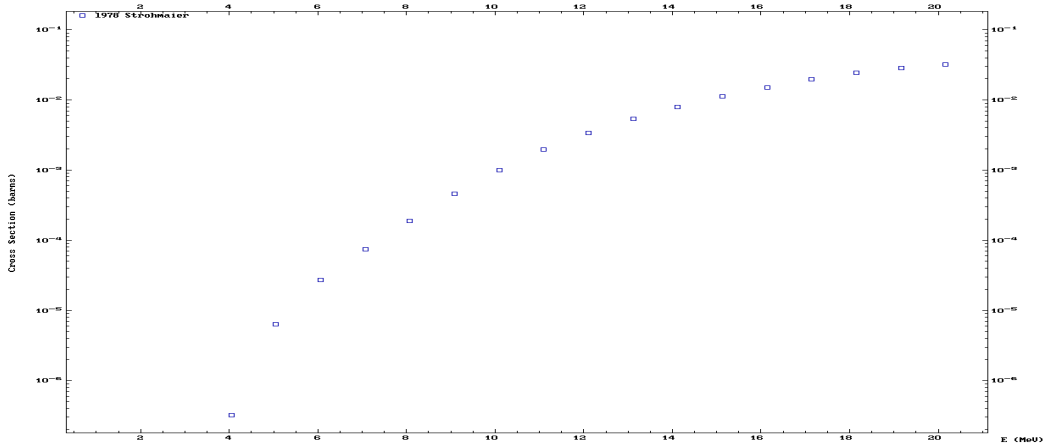


Figura 176. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,p+X)

[14] 56-Ba-134(n,T)55-Cs-132. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

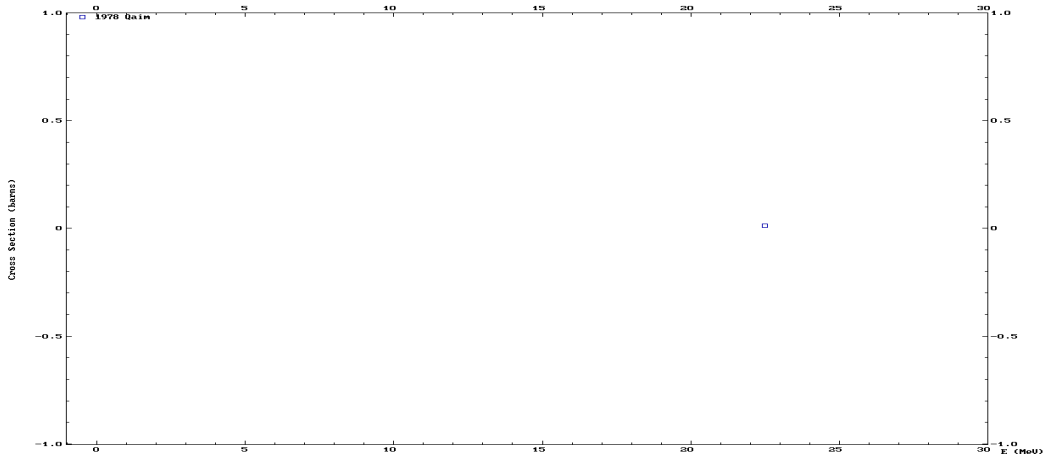


Figura 177. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,T)55-Cs-132

[15] 56-Ba-134(n,TOT). En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

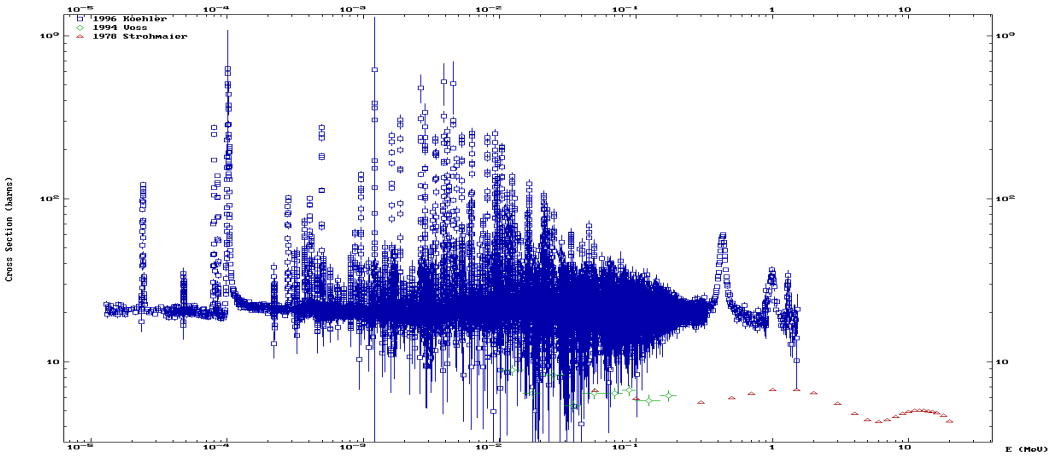


Figura 178. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-134(n,TOT)

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 134Ba con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	***Rango de energías de activación***	***Rango de σ***	***Comentarios***
56-Ba-134(n,g)56-Ba-135	Menor d e10 MeV	Variable, maximo 0,2	De interés

Tabla 84. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 134Ba con los neutrones.

5.6.1.1. Reacción 56-Ba-134(n,g)56-Ba-135.

El elemento producido en esta reacción es estable y no interfiere en la lectura.

5.6.2. Reacciones del 135Ba con los neutrones.

[1] 56-Ba-135(n,2n)56-Ba-134. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

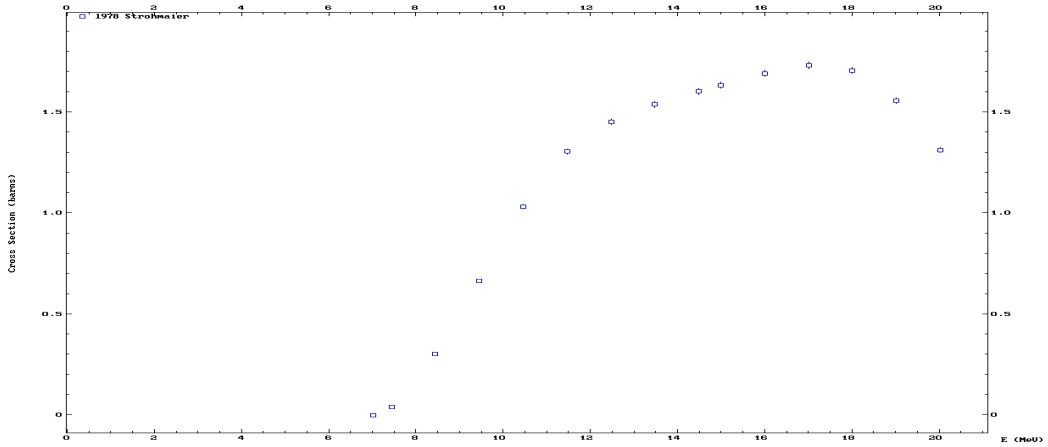


Figura 179. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,2n)56-Ba-134

[2] 56-Ba-135(n,3n)56-Ba-133-G. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

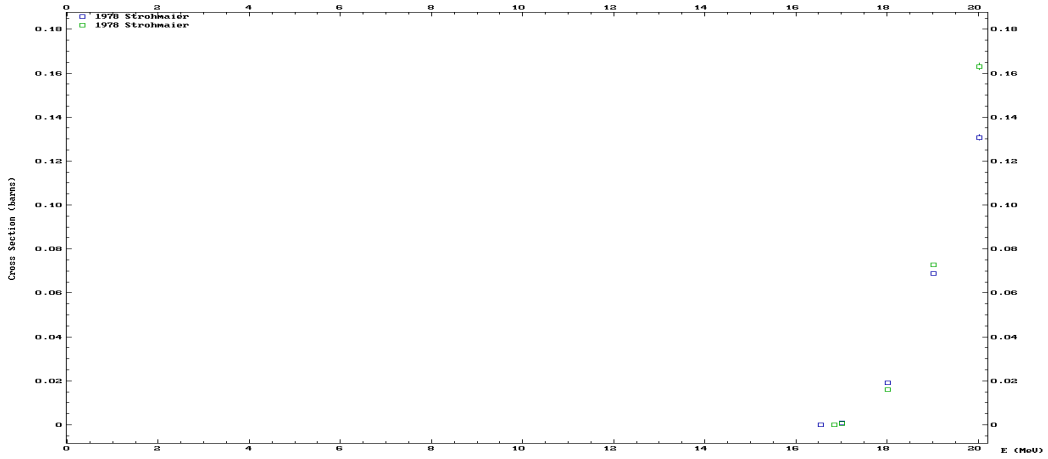


Figura 180. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,3n)56-Ba-133-G

[3] 56-Ba-135(n,non). En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

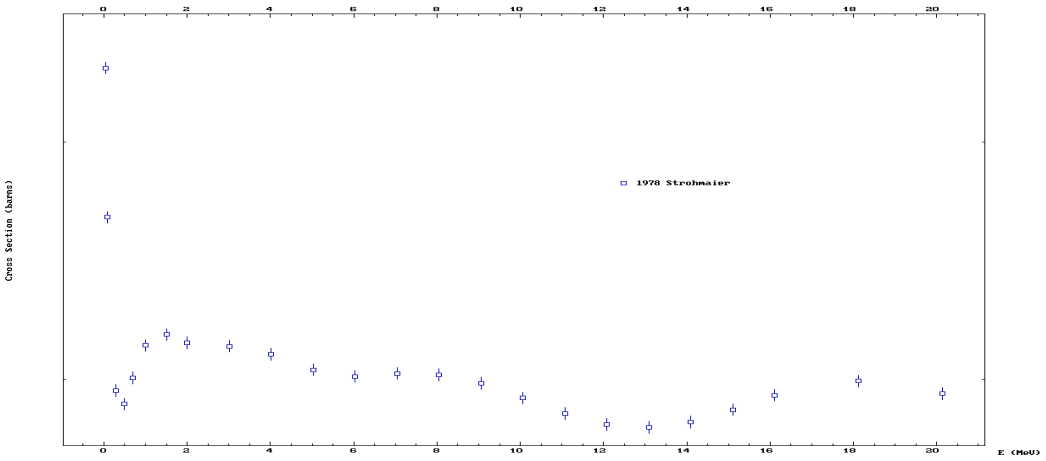


Figura 181. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,non)

[4] 56-Ba-135(n,g)56-Ba-136. Con las siguientes secciones eficaces.

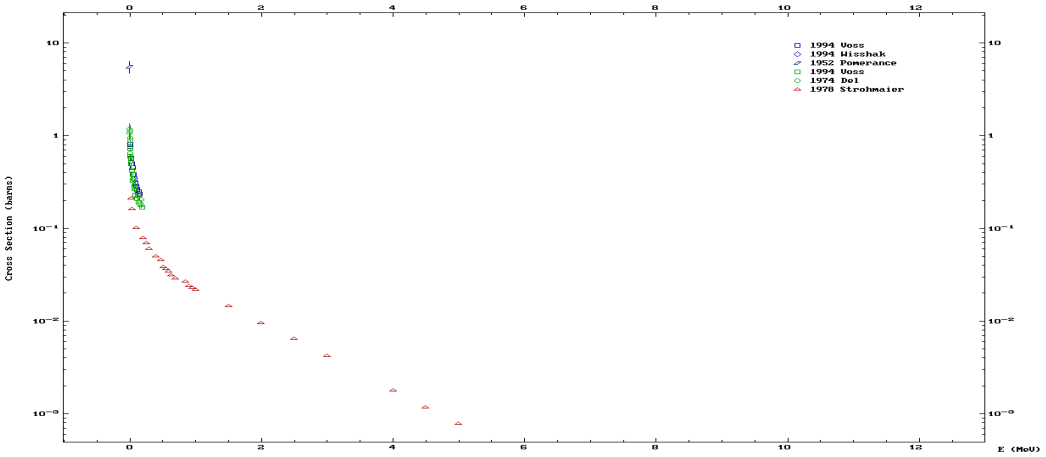


Figura 182. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,g)56-Ba-136

[5] 56-Ba-135(n,g+X). Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

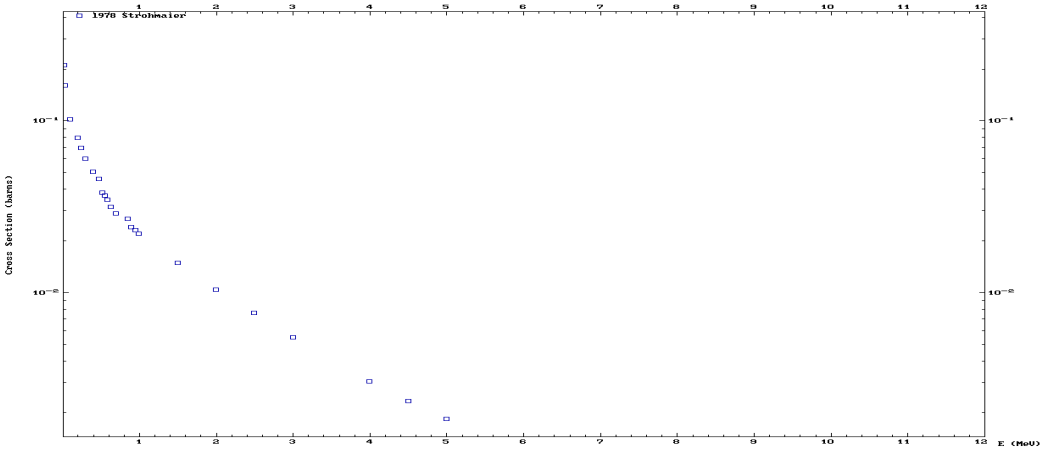


Figura 183. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,g+X)

[6] 56-Ba-135(n,2n)56-Ba-135-M. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

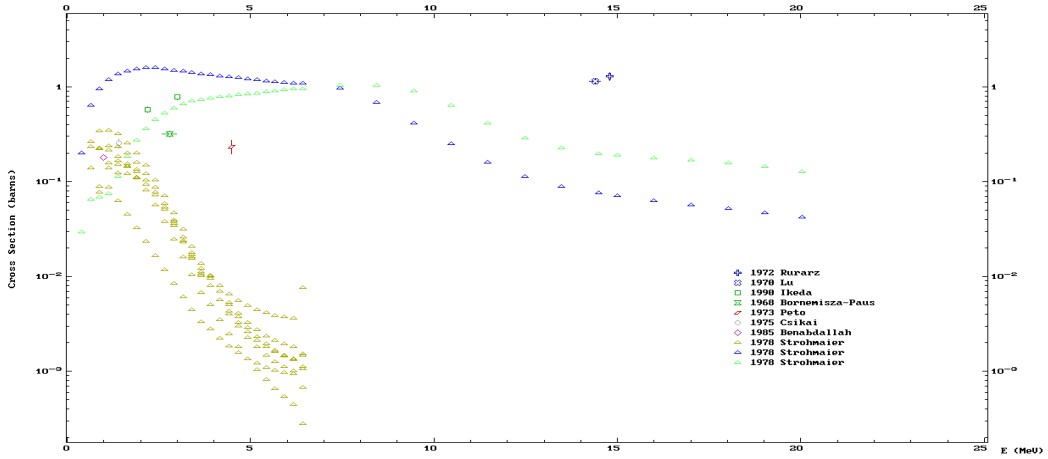


Figura 184. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,2n)56-Ba-135-M

[7] 56-Ba-135(n,n+p)55-Cs-134-G. La sección eficaz es

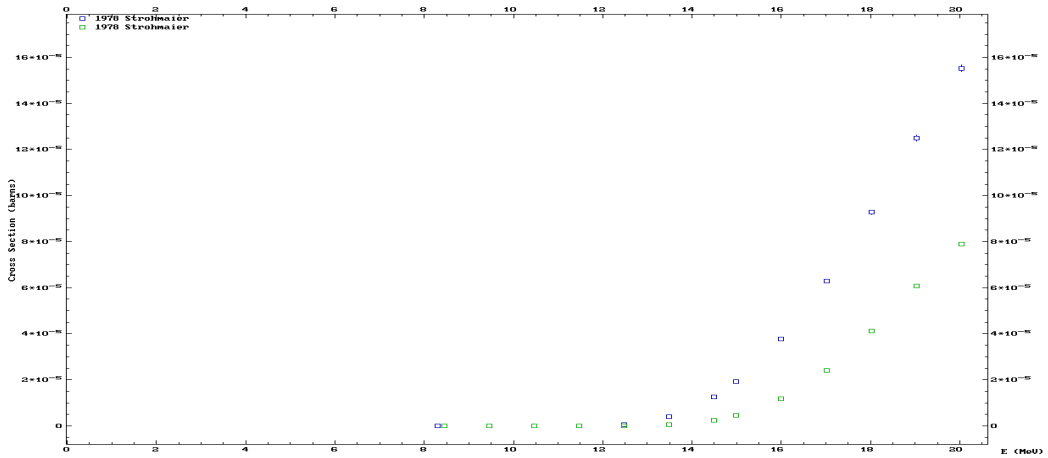


Figura 185. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,n+p)55-Cs-134-G

[8] 56-Ba-135(n,n+X). La sección eficaz correspondiente es

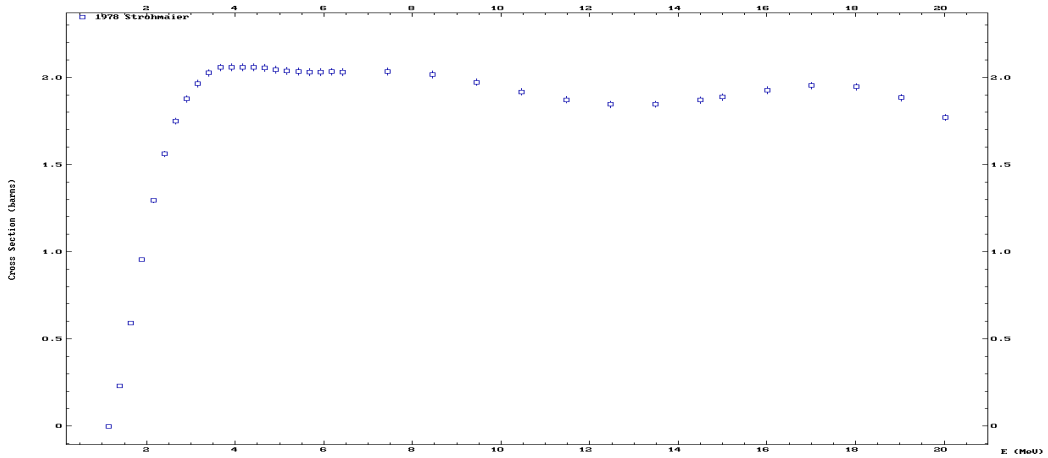


Figura 186. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,n+X)

[9] 56-Ba-135(n,non). Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

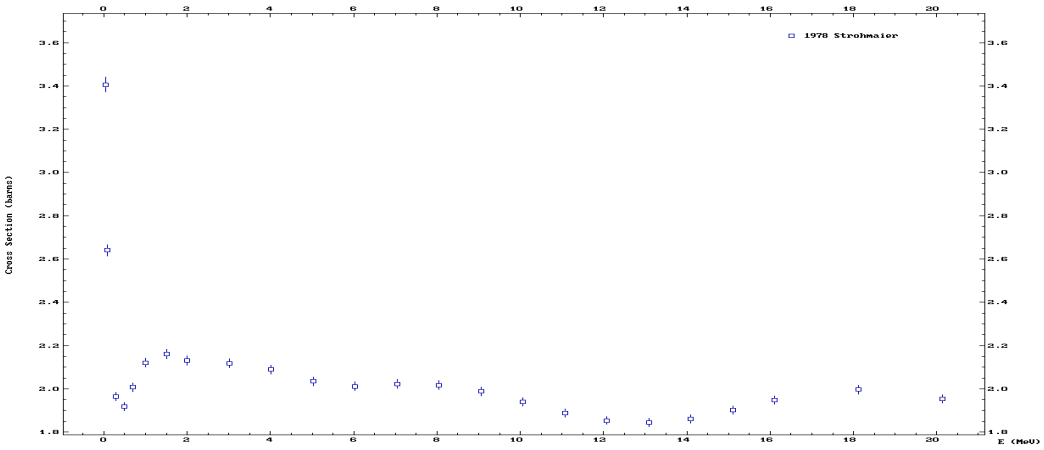


Figura 187. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,non)

[10] 56-Ba-135(n,p)55-CS-135-M. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

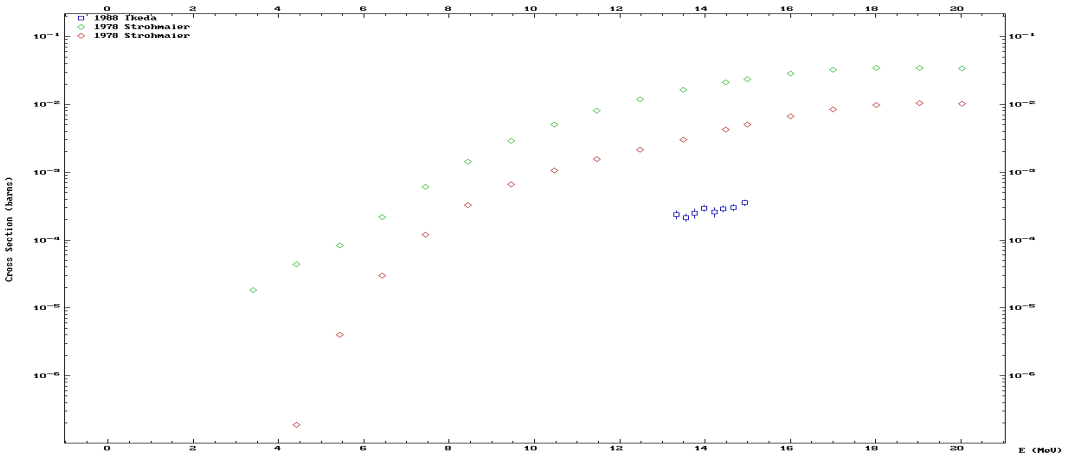


Figura 188. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,p)55-CS-135-M

[11] 56-Ba-135(n,p+n)55-Cs-134-G. sus secciones eficaces son

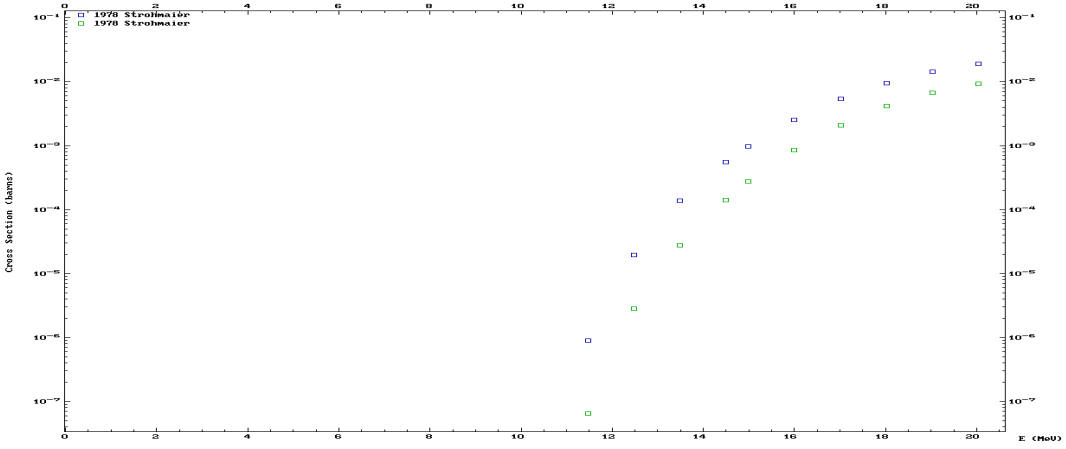


Figura 189. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,p+n)55-Cs-134-G

[12] 56-Ba-135(n,p+X). Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

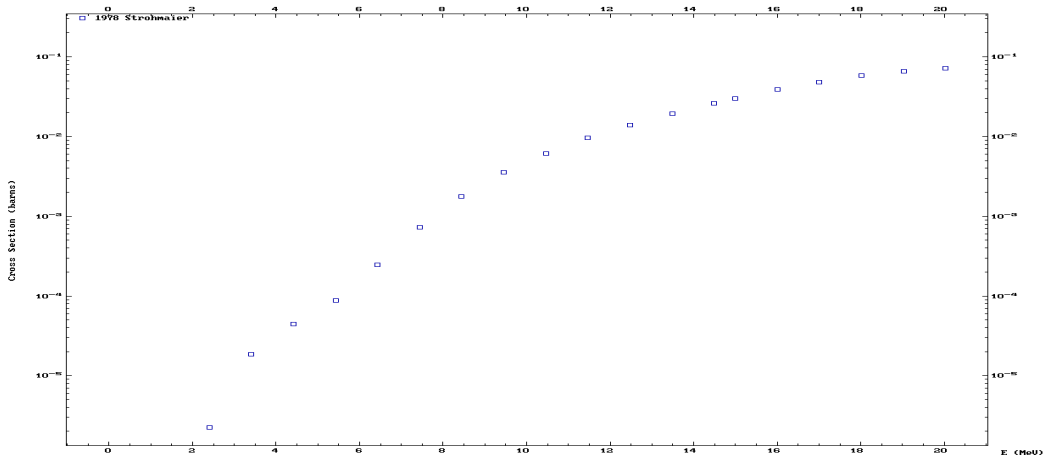


Figura 190. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,p+X)

[13] 56-Ba-135(n,TOT). . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

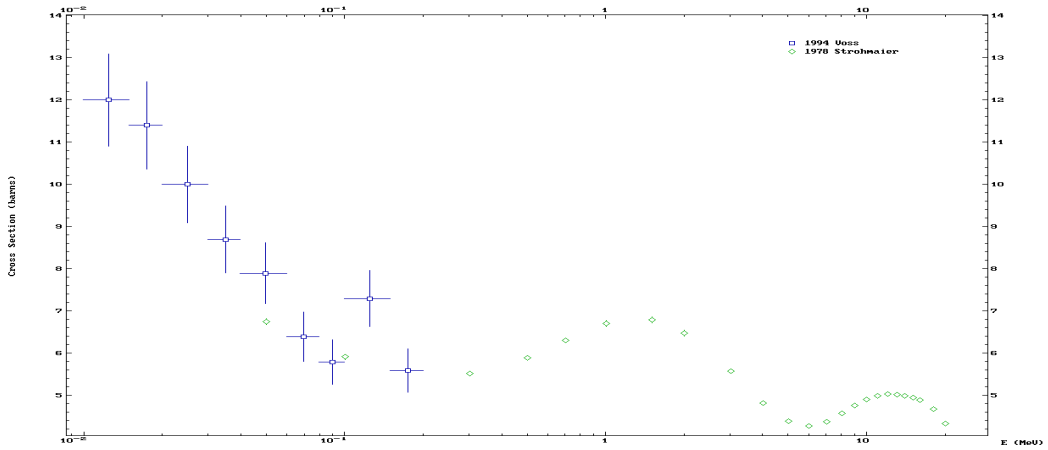


Figura 191. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-135(n,TOT)

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 135 con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	***Rango de energías de activación***	***Rango de σ***	***Comentarios***
56-Ba-135(n,g)56-Ba-136	Menor de 5 MeV	Menor que 0,01	Escaso interes

Tabla 85. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 135 con los neutrones.

Debido a su escaso interés y a la baja proporción en la naturaleza de este elemento, no se considera su estudio.

5.6.3. Reacciones del 136Ba con los neutrones.

[1] 56-Ba-136(n,2n)56-Ba-135-M. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

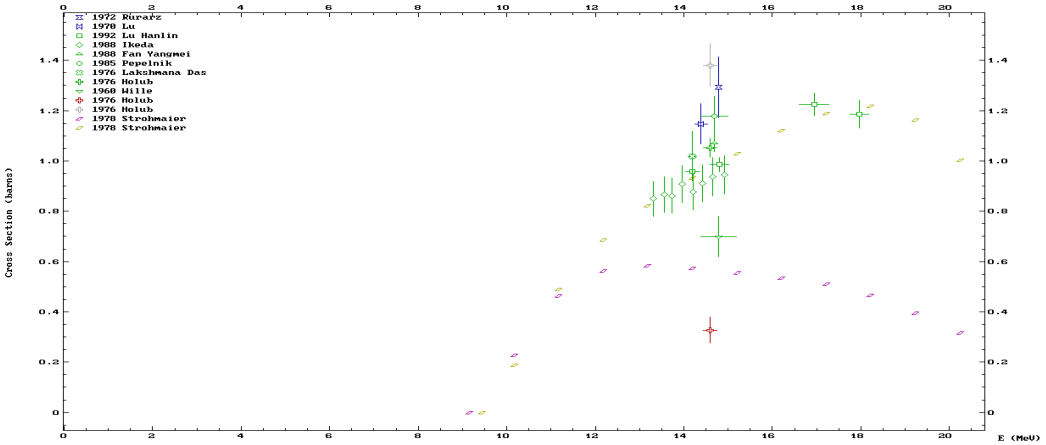


Figura 192. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,2n)56-Ba-135-M

[2] 56-Ba-136(n,3n)56-Ba-134. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

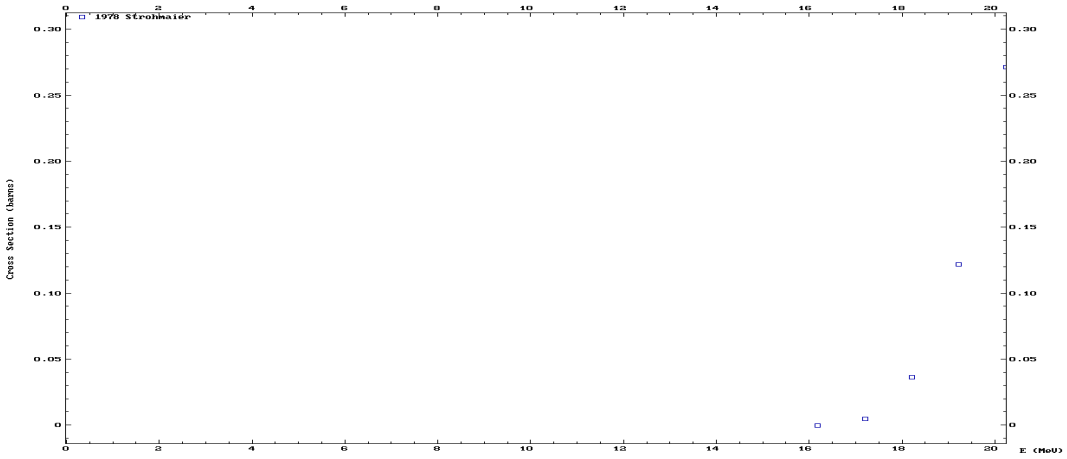


Figura 193. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,3n)56-Ba-134

[3] 56-Ba-136(n,α)54-Xe-133-M. Con las siguientes secciones eficaces.

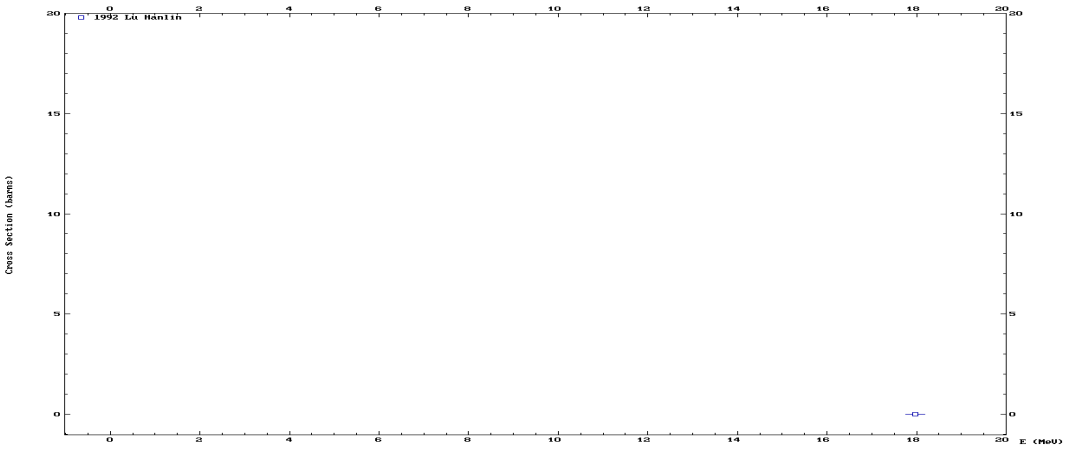


Figura 194. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,α)54-Xe-133-M

[4] 56-Ba-136(n,non). Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

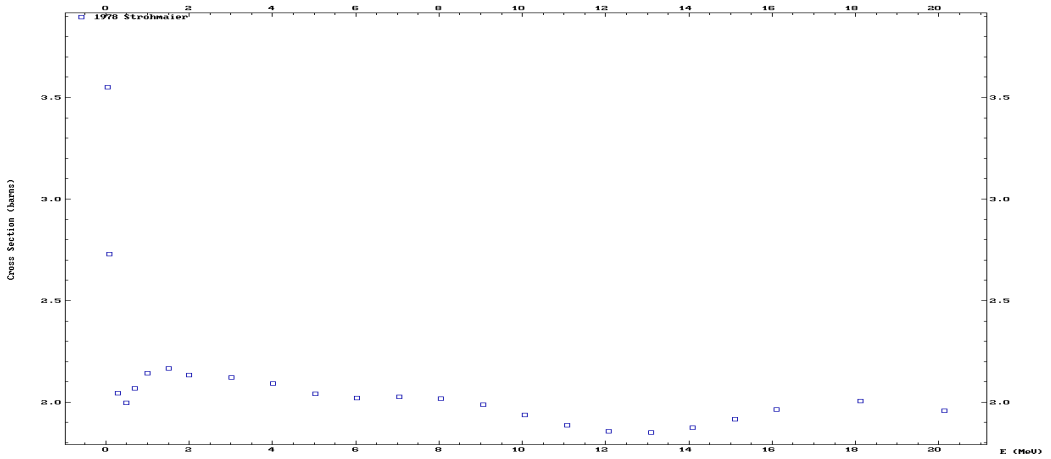


Figura 195. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,non)

[5] 56-Ba-136(n,g)56-Ba-137. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

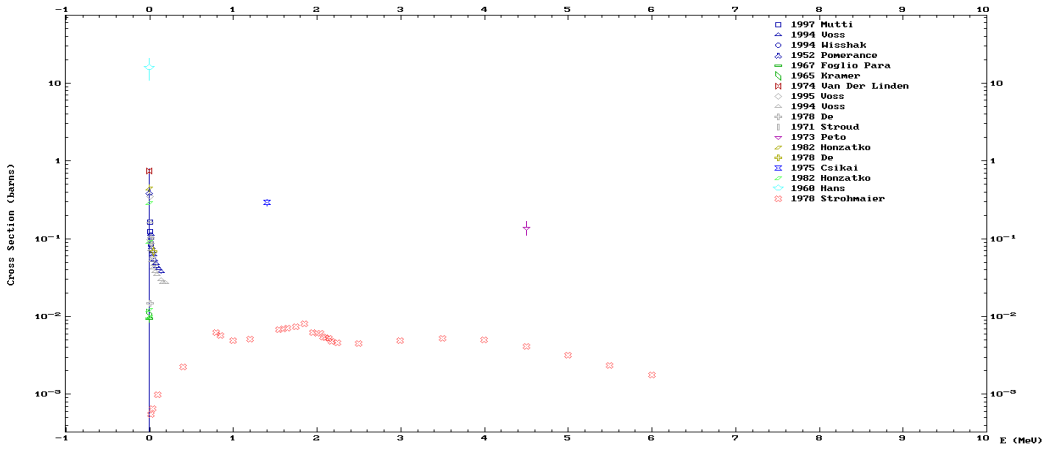


Figura 196. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,g)56-Ba-137

[6] 56-Ba-136(n,g)56-Ba-137. La sección eficaz es

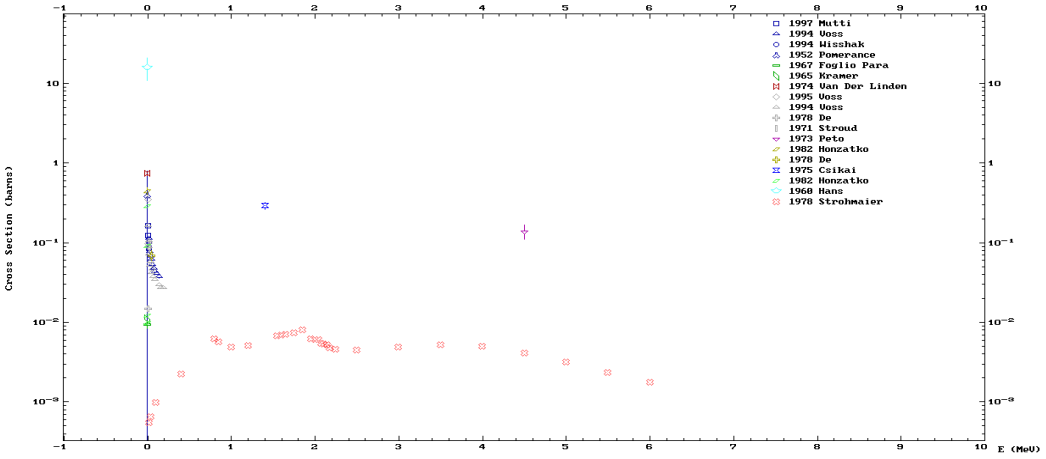


Figura 197. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,g)56-Ba-137

[7] 56-Ba-136(n,g+X). La sección eficaz correspondiente es

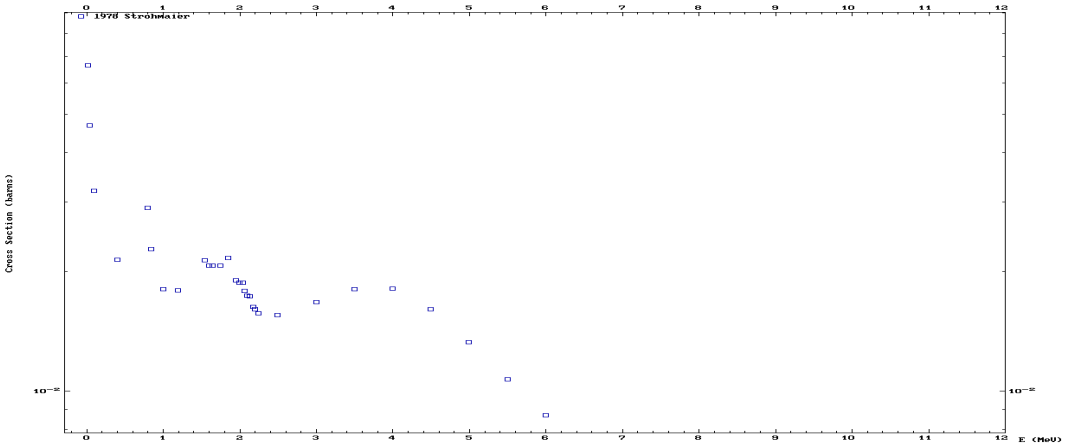


Figura 198. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,g+X)

[8] 56-Ba-136(n,INL)56-Ba-136-M. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

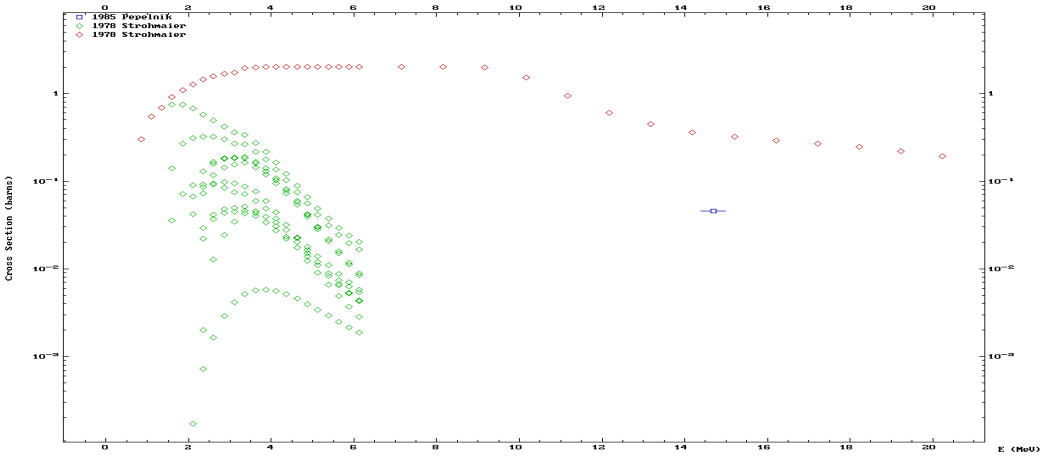


Figura 199. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,INL)56-Ba-136-M

[9] 56-Ba-136(n,n+p)55-Cs-135-G. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

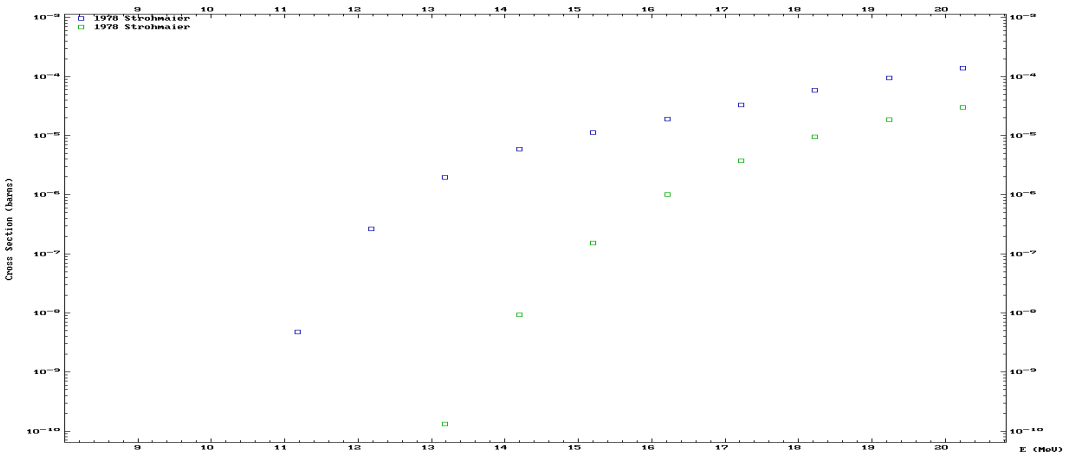


Figura 200. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,n+p)55-Cs-135-G

[10] 56-Ba-136(n,n+X). sus secciones eficaces son

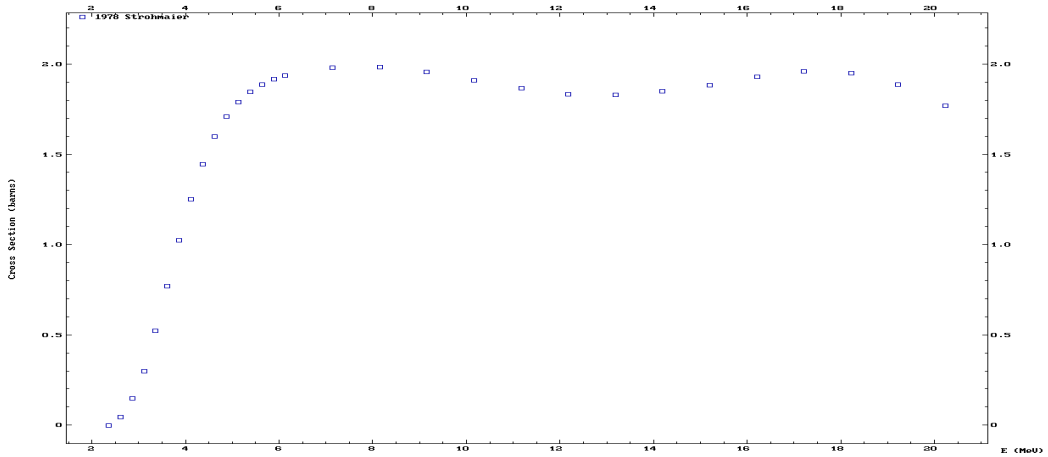


Figura 201. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,n+X)

[11] 56-Ba-136(n,non). Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

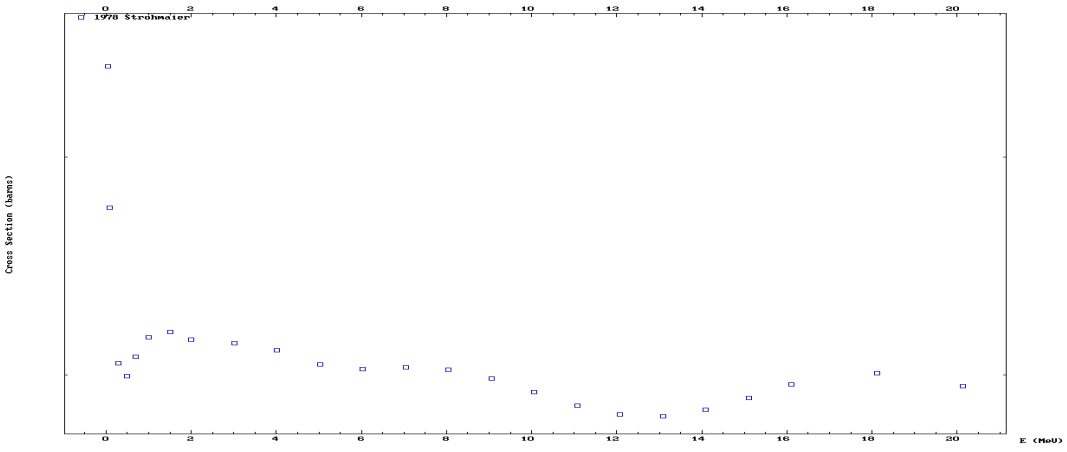


Figura 202. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,non)

[12] 56-Ba-136(n,p)55-CS-136-G. . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

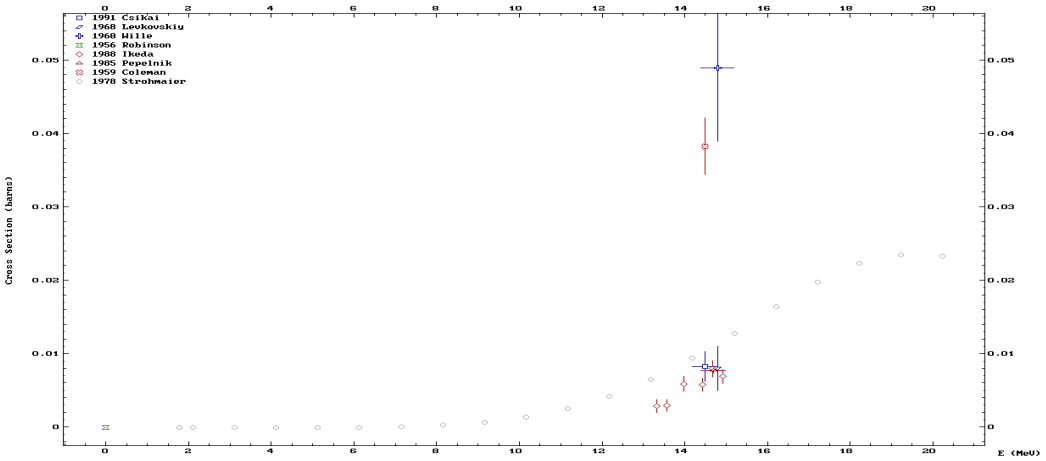


Figura 203. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,p)55-CS-136-G

[13] 56-Ba-136(n,p+n)55-Cs-135-G. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

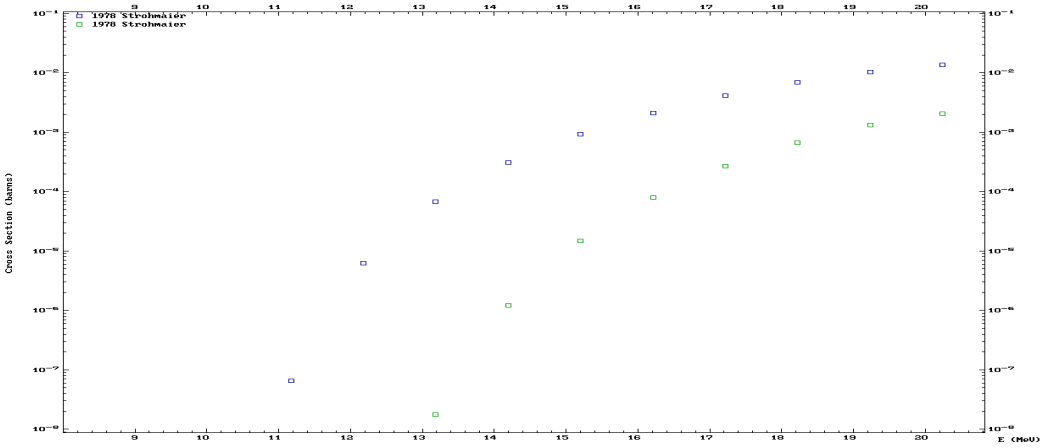


Figura 204. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,p+n)55-Cs-135-G

[14] 56-Ba-136(n,p+X). En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

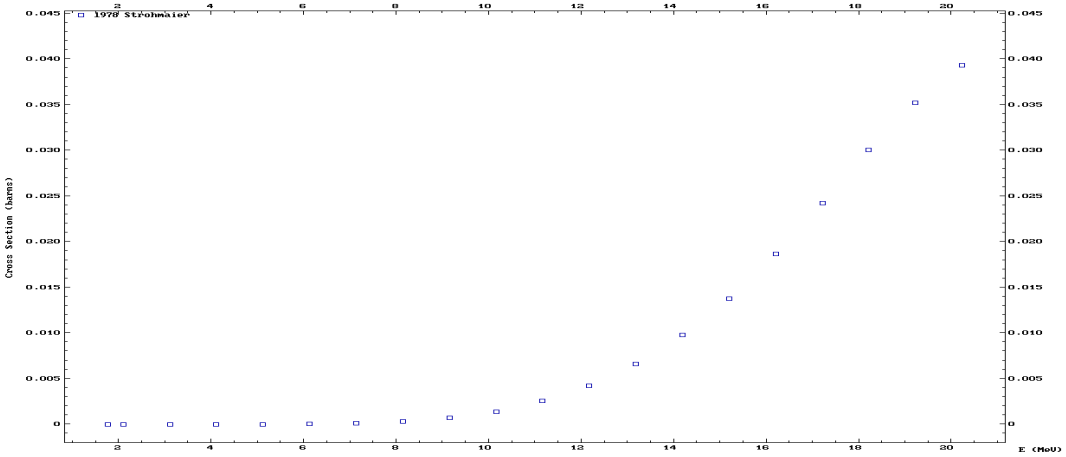


Figura 205. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,p+X)

[15] 56-Ba-136(n,SCT)56-Ba-136. Con las siguientes secciones eficaces.

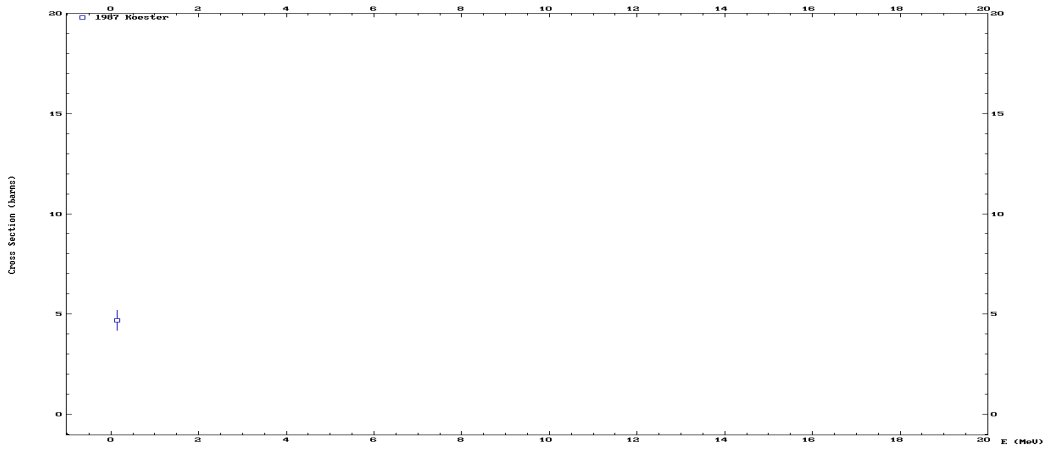


Figura 206. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,SCT)56-Ba-136

[16] 56-Ba-136(n,TOT). Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

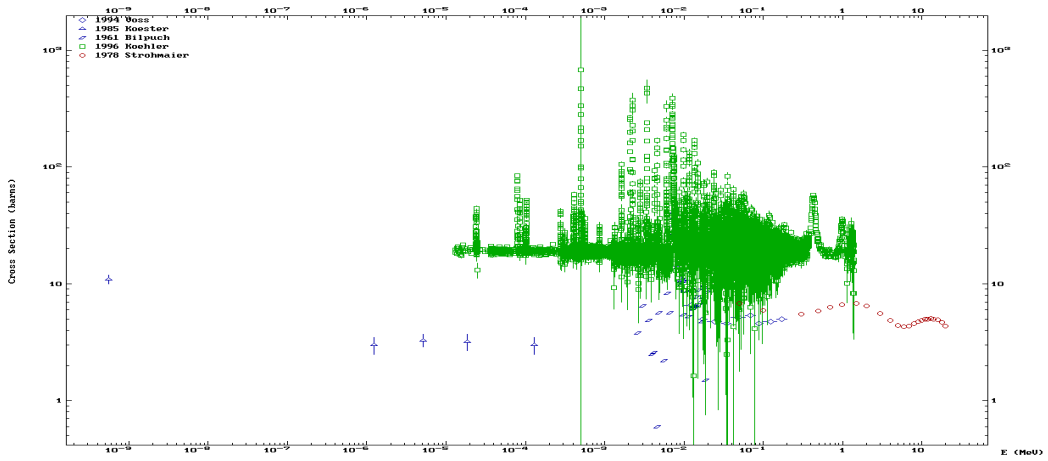


Figura 207. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-136(n,TOT)

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 136Ba con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	***Rango de energías de activación***	***Rango de σ***	***Comentarios***
56-Ba-136(n,g)56-Ba-137	Menor que 6	Menor que 0,01 en la zona de interes más 2 lecturas entre 0,1 y 0,3	De escaso interés

Tabla 86. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 136Ba con los neutrones.

Debido a su escaso interés, y a la escasa proporción de 136 Ba en la nauraleza, no se considera este estudio.

5.6.4. Reacciones del 137Ba con los neutrones.

[1] 56-Ba-137(n,2n)56-Ba-136-M. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

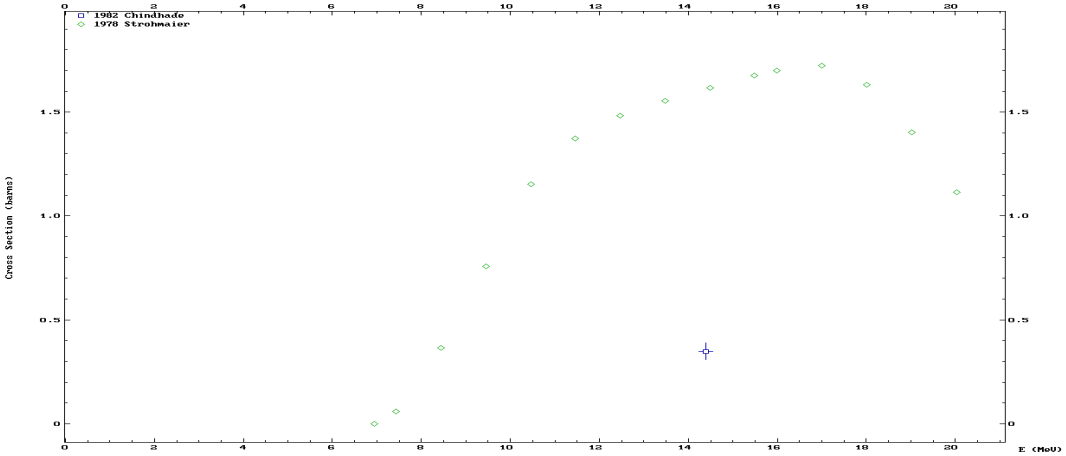


Figura 208. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,2n)56-Ba-136-M

[2] 56-Ba-137(n,3n)56-Ba-135-G. La sección eficaz es

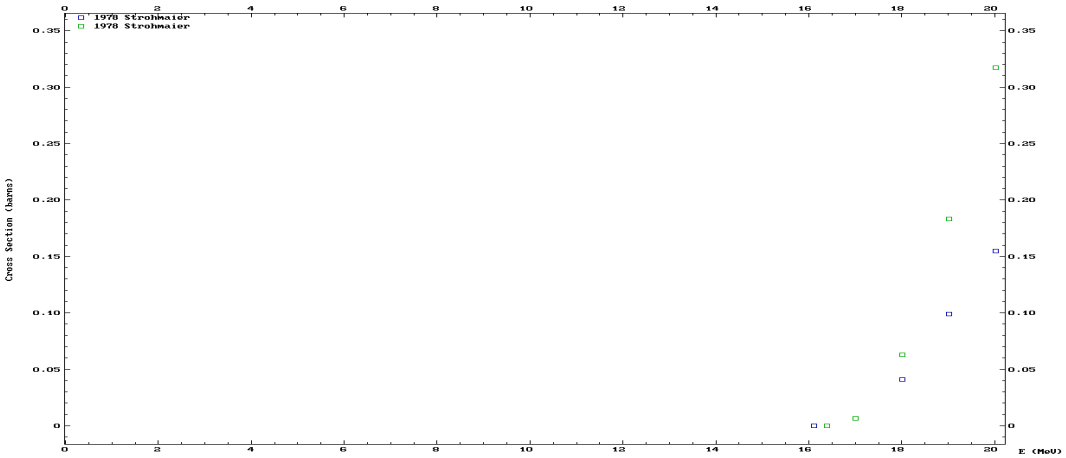


Figura 209. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,3n)56-Ba-135-G

[3] 56-Ba-137(n,non). La sección eficaz correspondiente es

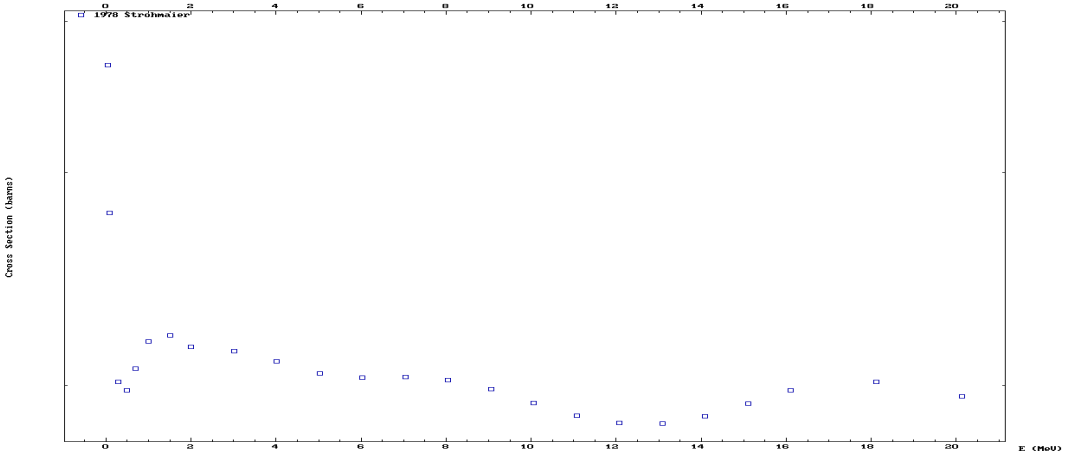


Figura 210. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,non)

[4] 56-Ba-137(n,g)56-Ba-138. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

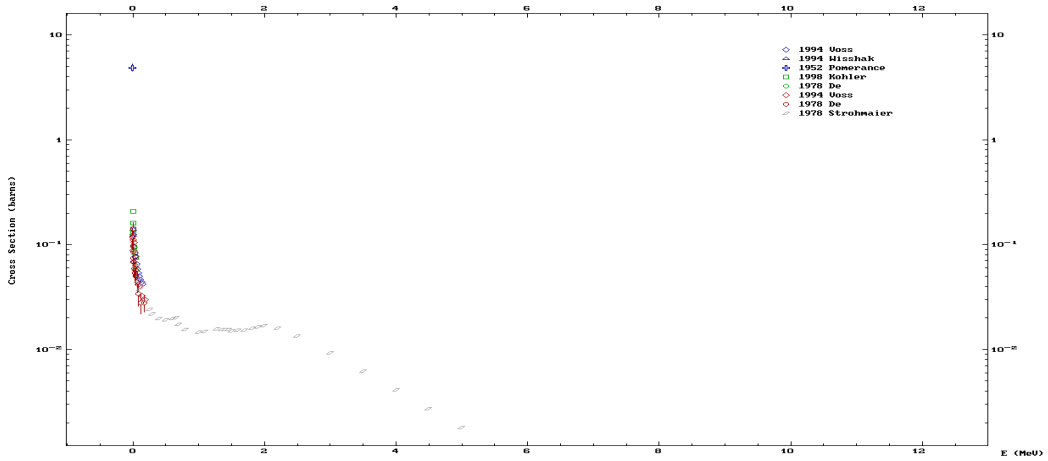


Figura 211. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,g)56-Ba-138

[5] 56-Ba-137(n,g+X). En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

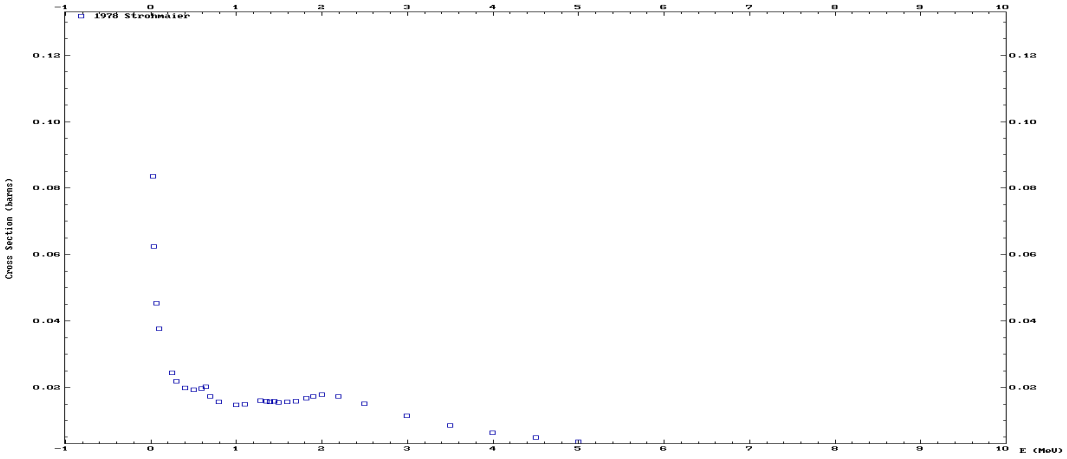


Figura 212. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,g+X)

[6] 56-Ba-137(n,INL)56-Ba-137-M. sus secciones eficaces son

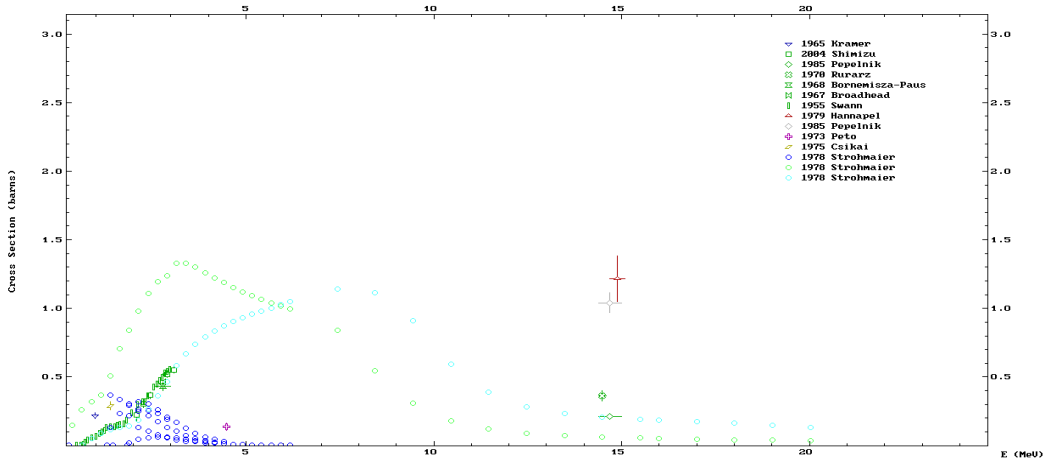


Figura 213. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,INL)56-Ba-137-M

[7] 56-Ba-137(n,n+p)55-CS-136. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

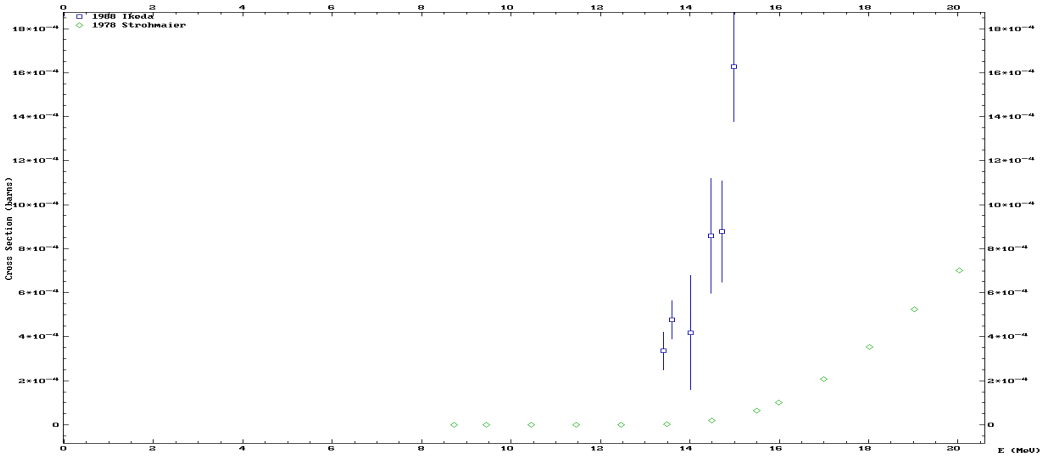


Figura 214. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,n+p)55-CS-136

[8] 56-Ba-137(n,n+X). . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

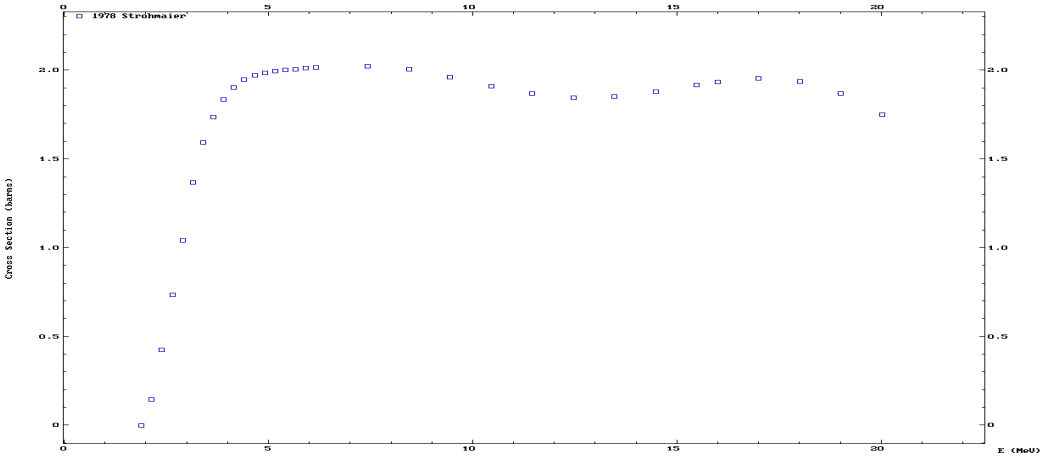


Figura 215. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,n+X)

[9] 56-Ba-137(n,non). Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

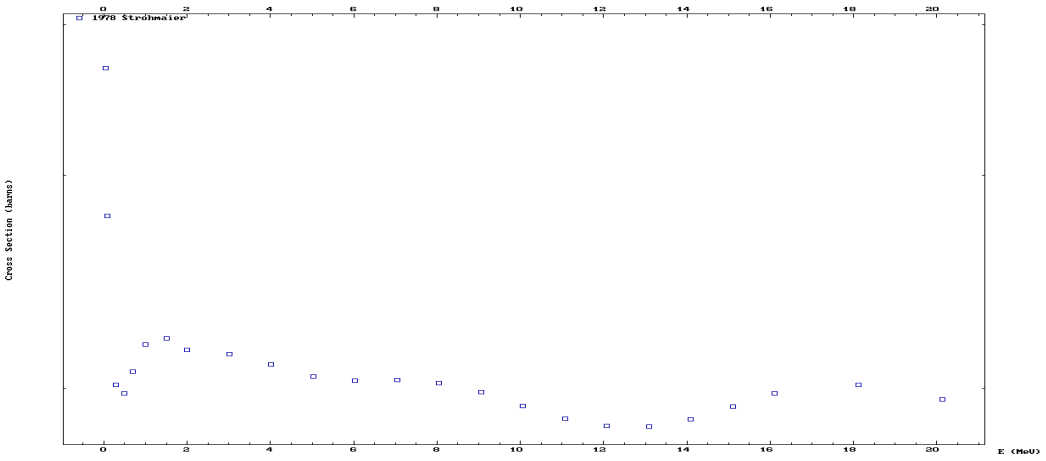


Figura 216. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,non)

[10] 56-Ba-137(n,p)55-Cs-137. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

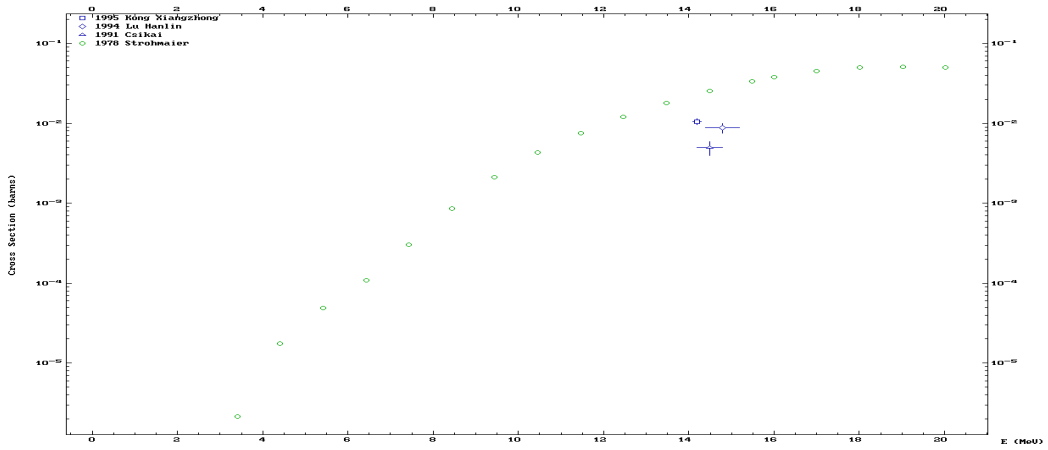


Figura 217. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,p)55-Cs-137

[11] 56-Ba-137(n,p+n)55-Cs-136. Con las siguientes secciones eficaces.

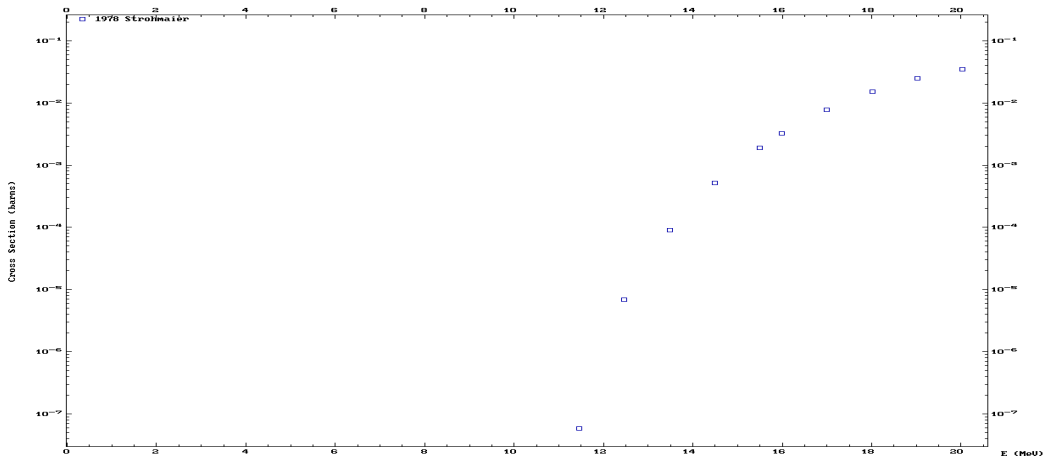


Figura 218. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,p+n)55-Cs-136

[12] 56-Ba-137(n,p+X). Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

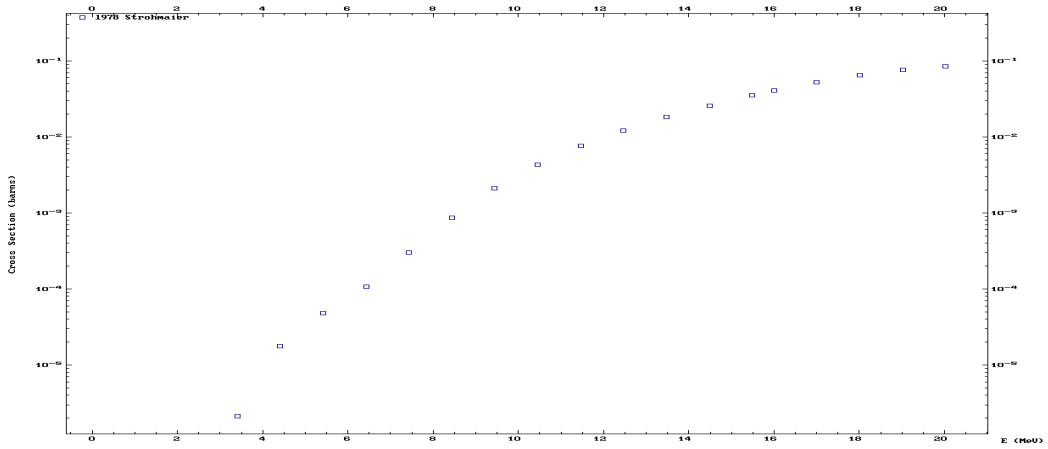


Figura 219. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,p+X)

[13] 56-Ba-137(n,SCT)56-Ba-137. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

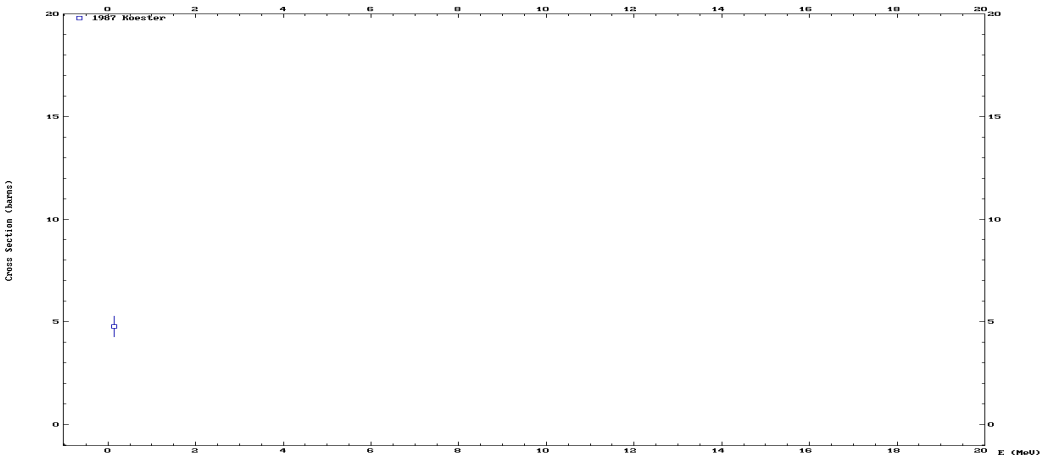


Figura 220. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,SCT)56-Ba-137

[14] 56-Ba-137(n,TOT). La sección eficaz es

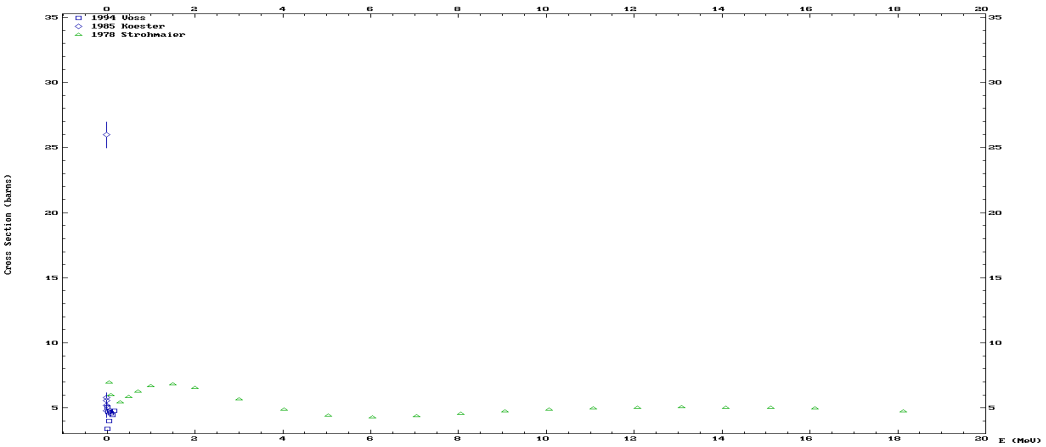


Figura 221. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-137(n,TOT)

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 137Ba con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
56-Ba-137(n,g)56-Ba-138	Menor que 5 MeV	Menor que 0,02 en la zona de interes	Poco interés

Tabla 87. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 137Ba con los neutrones.

5.6.4.1. Reacción 56-Ba-137(n,g)56-Ba-138.

El elemento producido en esta reacción es estable y no interfiere en la lectura.

5.6.5. Reacciones del 138Ba con los neutrones.

[1] 56-Ba-138(n,2n)56-Ba-137-M. La sección eficaz correspondiente es

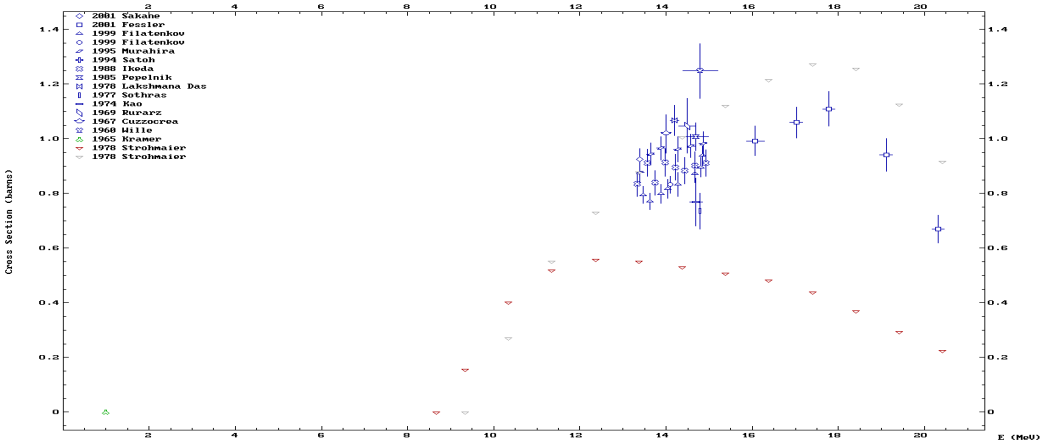


Figura 222. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,2n)56-Ba-137-M

[2] 56-Ba-138(n,3n)56-Ba-136. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

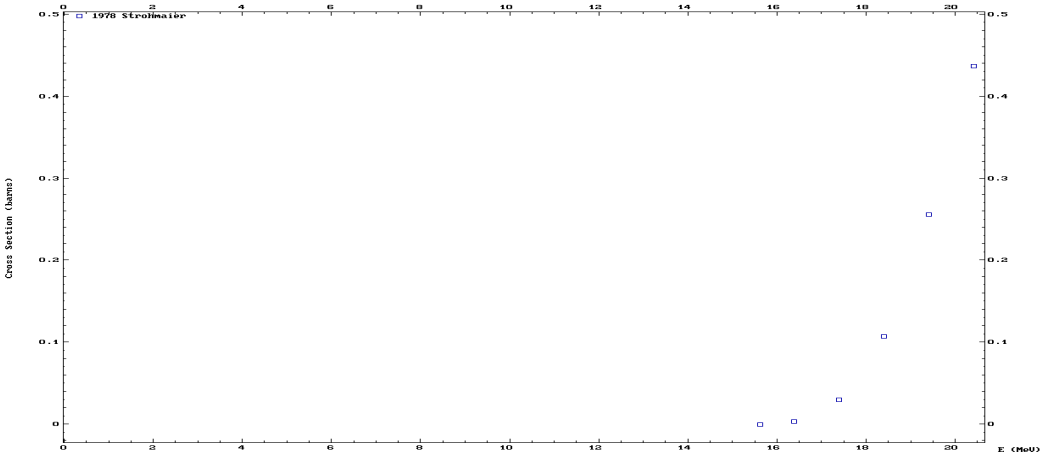


Figura 223. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,3n)56-Ba-136

[3] 56-Ba-138(n,α)54-Xe-135-M. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

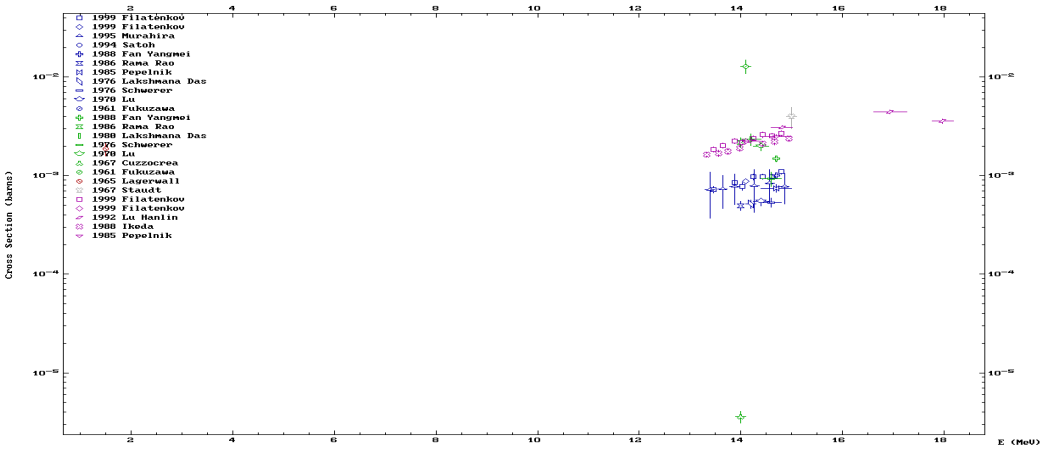


Figura 224. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,α)54-Xe-135-M

[4] 56-Ba-138(n,EL)56-Ba-138. sus secciones eficaces son

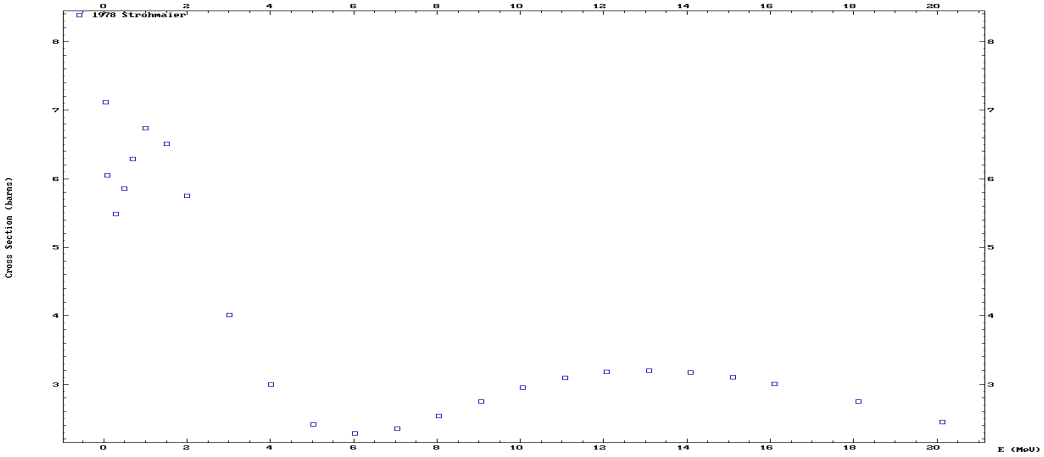


Figura 225. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,EL)56-Ba-138

[5] 56-Ba-138(n,g)56-Ba-139. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

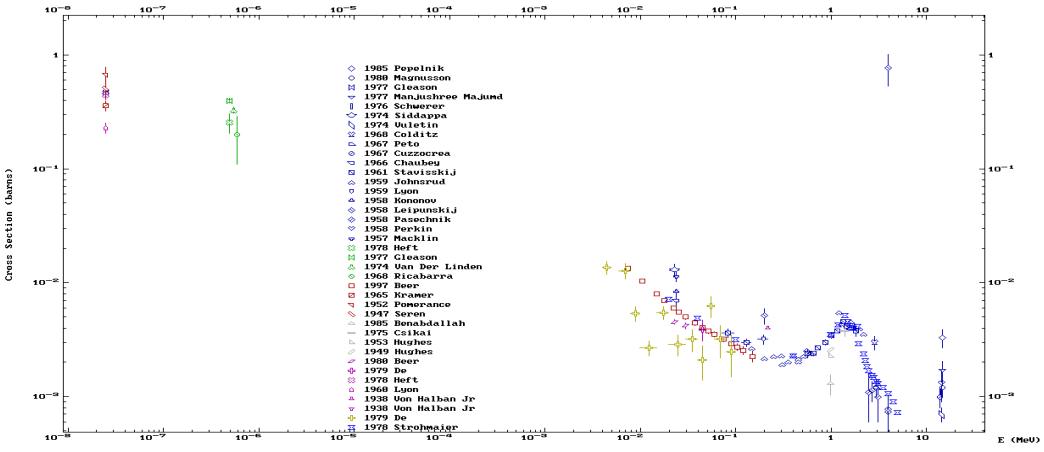


Figura 226. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,g)56-Ba-139

[6] 56-Ba-138(n,g+X).Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

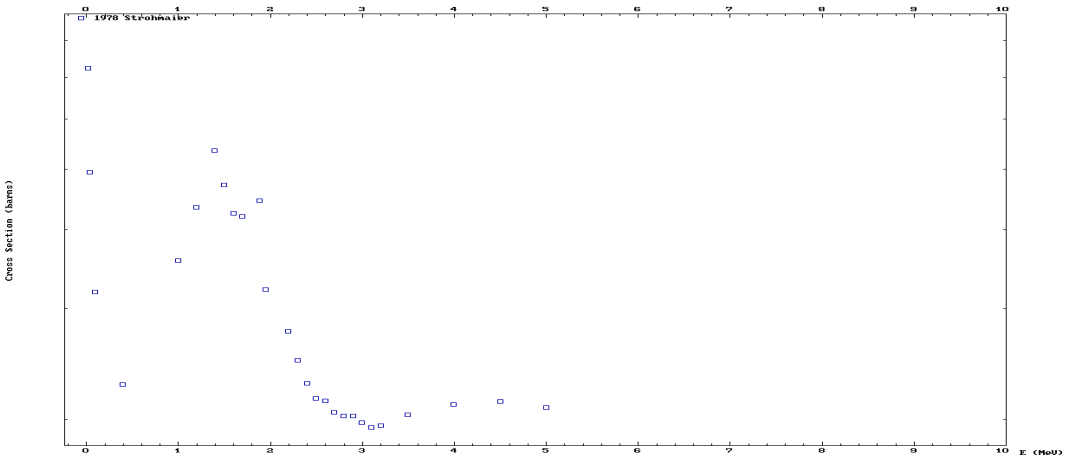


Figura 227. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,g+X)

[7] 56-Ba-138(n,2n)56-Ba-137-M. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

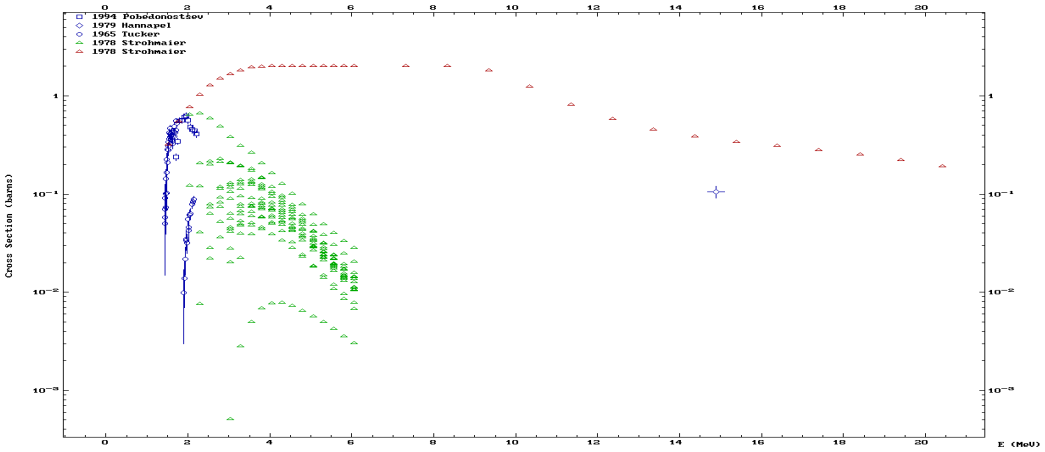


Figura 228. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,2n)56-Ba-137-M

[8] 56-Ba-138(n,n+3P)53-I-135-M. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

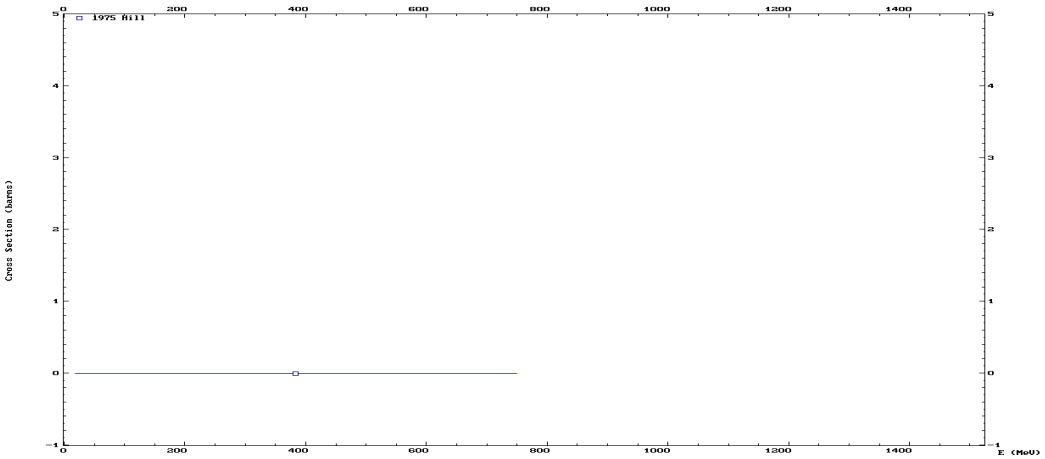


Figura 229. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,n+3P)53-I-135-M

[9] 56-Ba-138(n,n+p)55-Cs-137. Con las siguientes secciones eficaces.

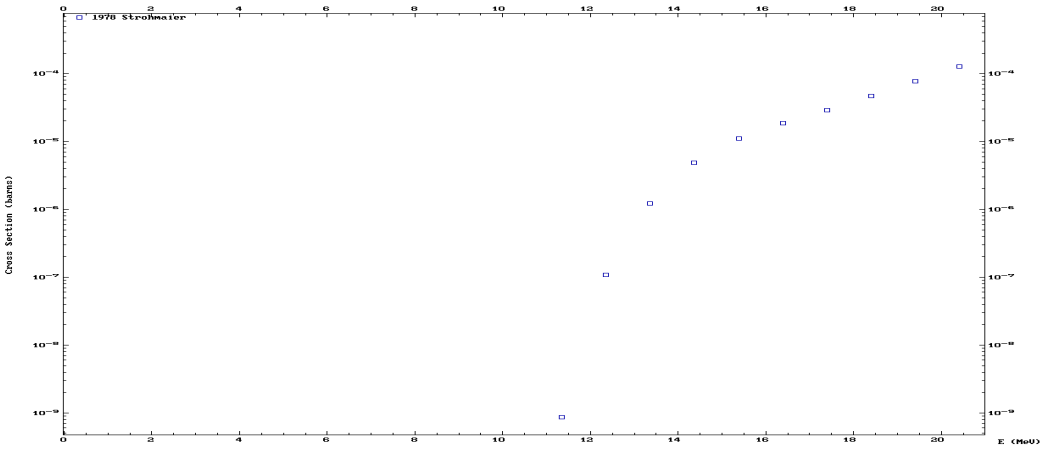


Figura 230. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,n+p)55-Cs-137

[10] 56-Ba-138(n,n+X). Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

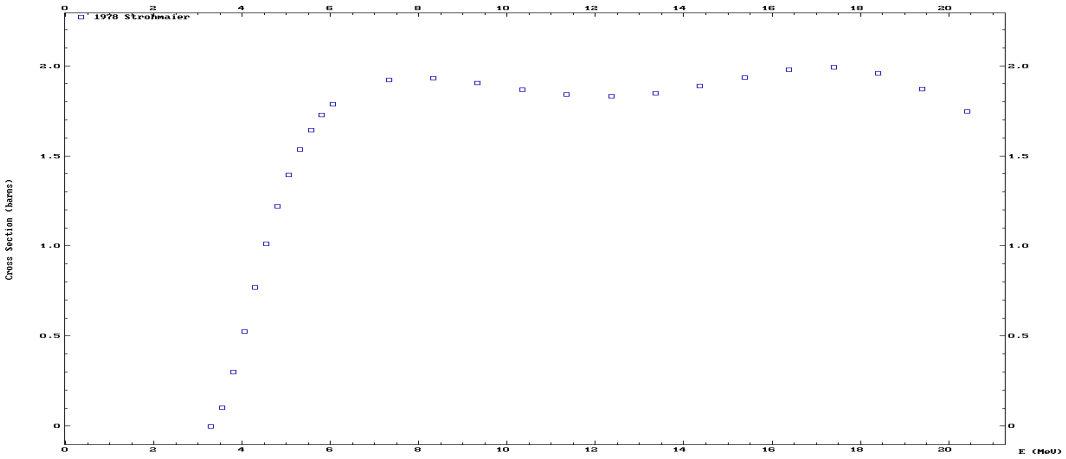


Figura 231. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,n+X)

[11] 56-Ba-138(n,p)55-Cs-138-G. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

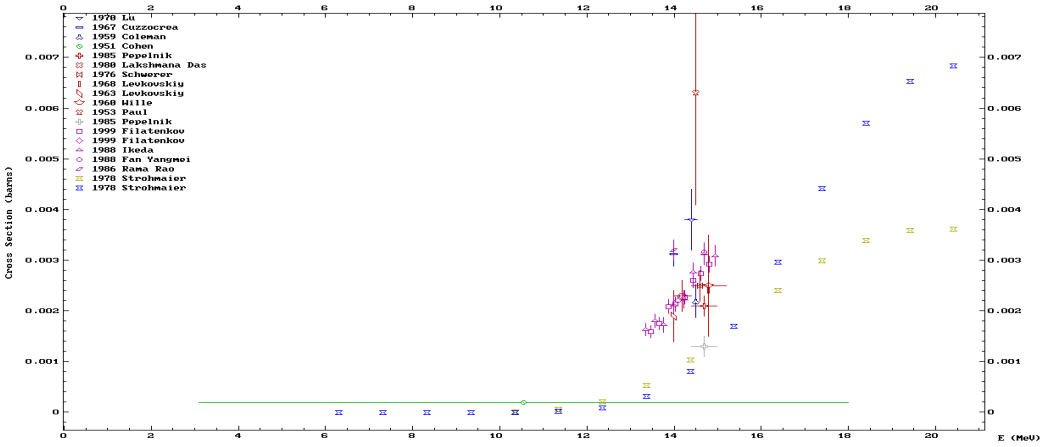


Figura 232. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,p)55-Cs-138-G

[12] 56-Ba-138(n,p+n)55-Cs-137. La sección eficaz es

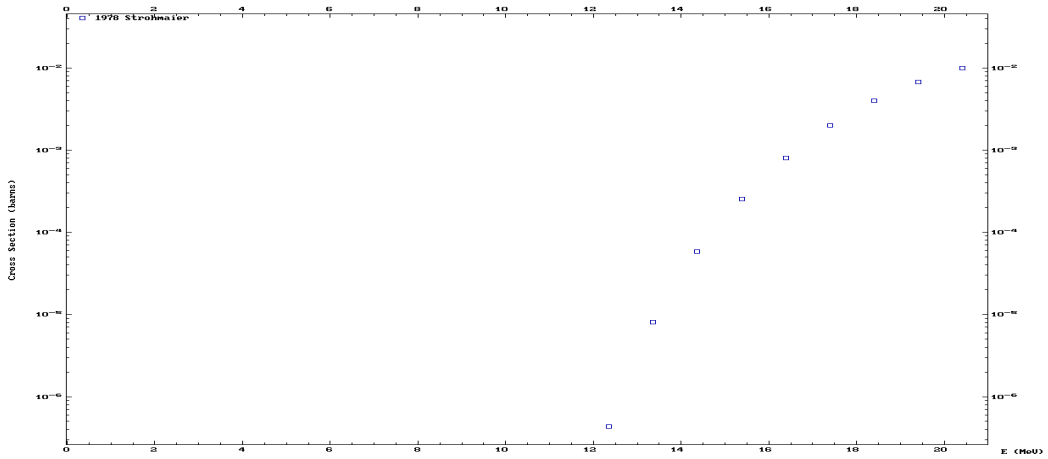


Figura 233. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,p+n)55-Cs-137

[13] 56-Ba-138(n,p+X). La sección eficaz correspondiente es

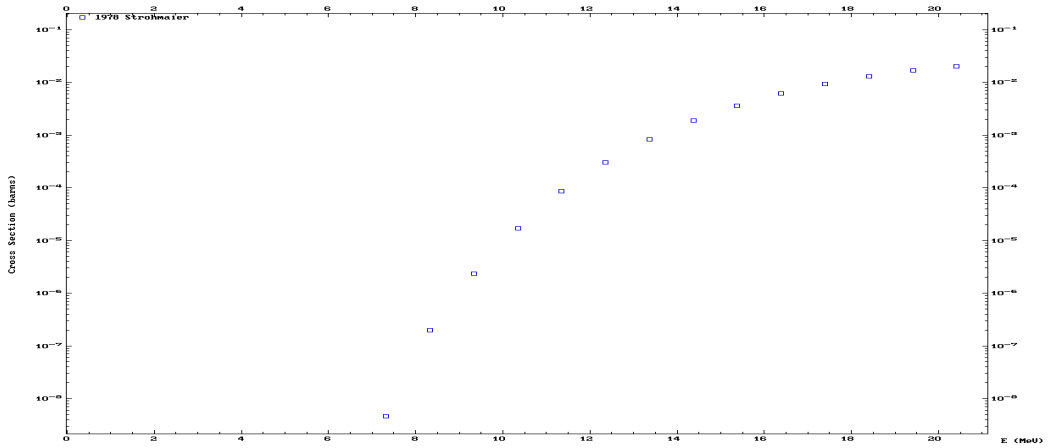


Figura 234. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,p+X)

[14] 56-Ba-138(n,SCT)56-Ba-138. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

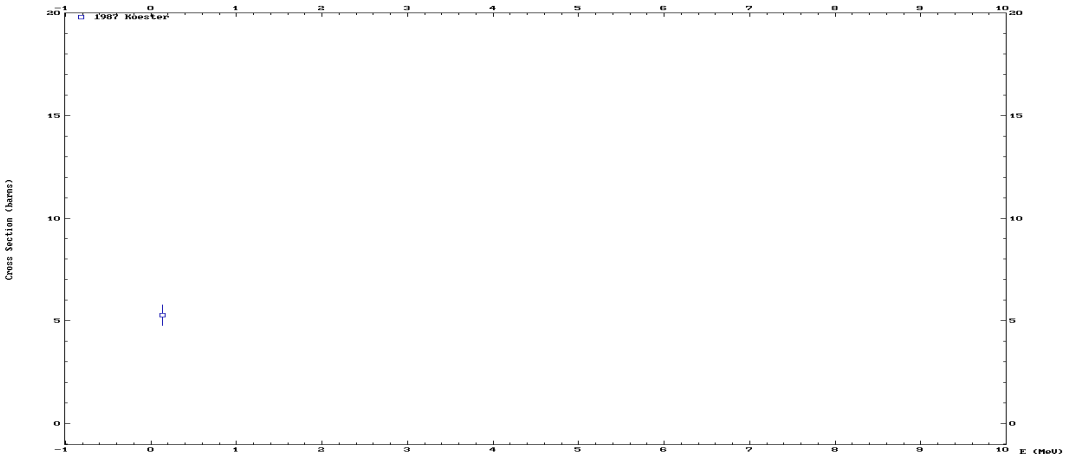


Figura 235. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,SCT)56-Ba-138

[15] 56-Ba-138(n,TOT). En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

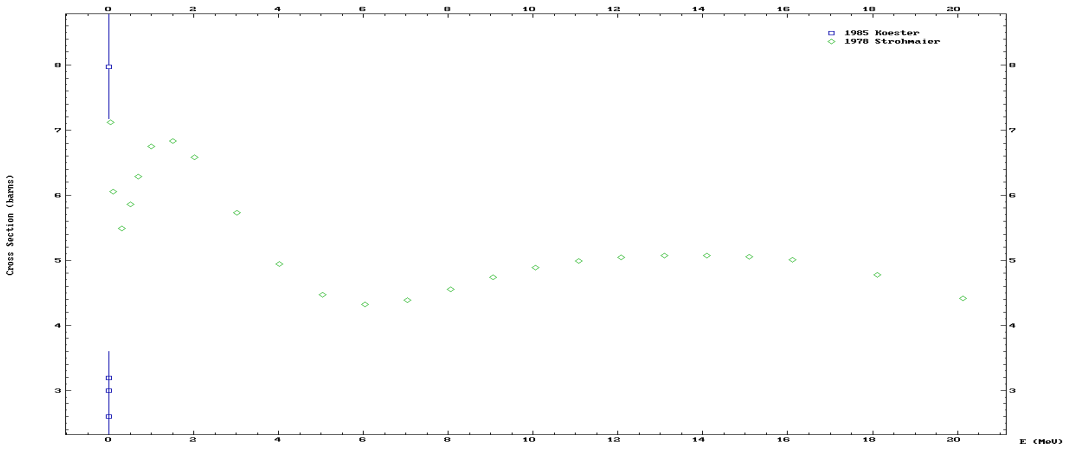


Figura 236. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(n,TOT)

[16] 56-Ba-138(N,X)55-Cs-137. sus secciones eficaces son

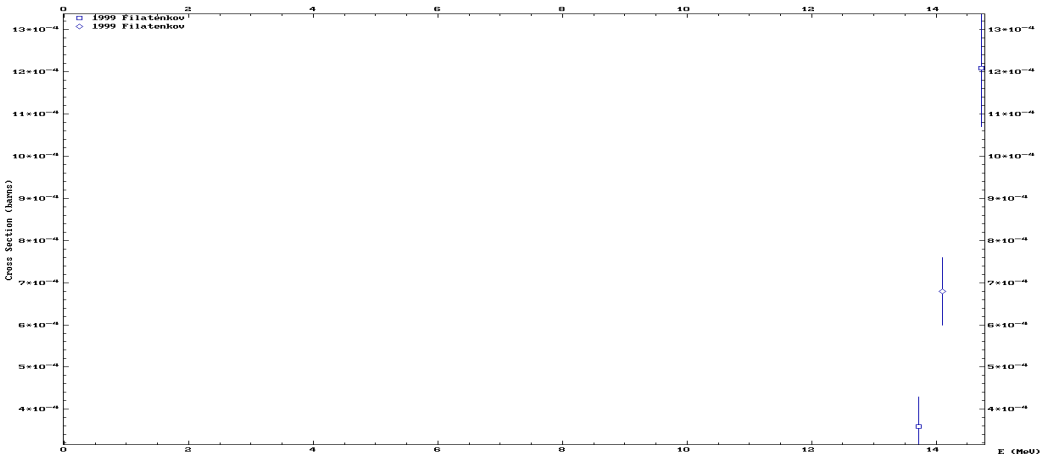


Figura 237. Sección eficaz de la reacción 56-Ba-138(N,X)55-Cs-137

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 138Ba con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	***Rango de energías de activación***	***Rango de σ***	***Comentarios***
56-Ba-138(n,g)56-Ba-139	Menor que 4 MeV	Menor que 0,04 Barns en la zona de interes	Poco interés

Tabla 88. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 138Ba con los neutrones.

5.6.5.1. Reacción 56-Ba-138(n,g)56-Ba-139.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{139}_{56}$Ba	0,0	7/2-	83,06 m	β^-: 100 %	2316,8	$^{139}_{57}$La

Tabla 89. Características de decaimiento del 56-Ba-139.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
71.89	257	7E-5 %	5.0E-8
102.76	354	5E-5 %	5E-8
116.93 9	396	1.3E-4 %	1.5E-7
138.5	460	2.9E-4 %	4.0E-7
170.66	551	3.0E-4 %	5.1E-7
172.31	556	0.0021 %	3.6E-6
200.8	634	0.0026 %	5.2E-6
240.3	739	5.2E-4 %	1.2E-6
247.9	759	2.8E-4 %	6.9E-7
256.3	780	0.0051 %	1.31E-5
279.6	840	0.0175 %	4.9E-5
301.7	896	0.287 %	8.66E-4
317.3	935	0.0032 %	1.02E-5
367.8	1060	0.0108 %	4.0E-5
383.3	1098	0.0042 %	1.6E-5
841.9	2151	29.7 %	0.250
916.9	2317	70.0 %	0.642

Tabla 90. Emisión β del decaimiento del 56Ba139

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión de electrons:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	3,8	4.6	1.74E-4
Auger K	27,4	0.4	1.33E-4
CE K	126,9329	5.0	0.0065
CE L	159,5912	0.69	0.00109
CE M	164,4962	0.141	2.3E-4
CE NP	165,5871	0.039	6.4E-5

Tabla 91. Emisión de electrones del 56Ba139.

- Emisión Gamma y X:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	4,65	0,61	2,8E-5
XR kα2	33,03	1,31	4,3E-4
XR kα1	33,442	2,4	8,0E-4
XR kβ3	37,72	0,23	8,7E-5
XR kβ1	37,801	0,44	1,67E-4
XR kβ2	38,726	0,143	5,5E-5
	165,8575	24	0,039
	1042,9	2,6E-5	2,7E-7
	1053,0	3,1E-4	3,3E-6
	1090,8	0,0081	8,8E-5
	1215,5	0,0031	3,8E-5
	1219,1	0,0039	4,8E-5
	1254,7	0,026	3,3E-4
	1256,7	0,0027	3,4E-5
	1310,6	0,0159	2,09E-4
	1370,5	0,0029	4,0E-5
	1381,5	8E-5	1,1E-6
	1392,4	8E-5	1,1E-6
	1420,5	0,26	0,0037
	1476,3	0,00159	2,35E-5
	1518	3E-5	4E-7
	1536,3	0,0021	3,2E-5
	1558,2	2,0E-4	3,2E-6
	1578,2	5,2E-4	8,2E-6
	1595,3	0,0021	3,3E-5
	1601,4	1,3E-4	2,1E-6
	1683,1	0,0026	4,3E-5
	1691,2	2,9E-4	4,9E-6
	1754,5	5E-5	9E-7
	1762	8E-5	1,4E-6
	1765,5	1,7E-4	3,0E-6
	1797,4	5E-5	9E-7
	1894,7	2,1E-5	4E-7
	1920,6	8E-5	1,5E-6
	2060,1	5,0E-5	1,0E-6

Tabla 92. Energía de la emisión γ y X del decaimiento del 56Ba139.

5.6.6. Conclusiones de las reacciones del Bario con los neutrones.

El único isótopo del Ba que podría influir en la activación de la fluorita es el 56Ba139, y como se ha visto, la emisión de la radiación gamma se encuentra en niveles de energía muy por debajo a la correspondiente al flúor.

5.7. Estudio del Hierro.

Los isótopos del Hierro son:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{52}Fe	0	52	0	8,28h	β^+,EC
^{54}Fe	5,82	53,9396	0	--	Estable
^{55}Fe	0	54,938	3/2	2,73y	EC
^{56}Fe	91,66	55,9349	0	--	Estable
^{57}Fe	2,19	56,9354	1/2	--	Estable
^{58}Fe	0,33	57,9333	0	--	Estable
^{59}Fe	0	58,935	3/2	45,51d	β^-
^{60}Fe	0	60	0	1,5E06y	β^-

Tabla 93. Isótopos del hierro.

5.7.1. Reacciones del 54Fe con los neutrones.

[1] 26-Fe-54(n,2n)26-Fe53-G. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

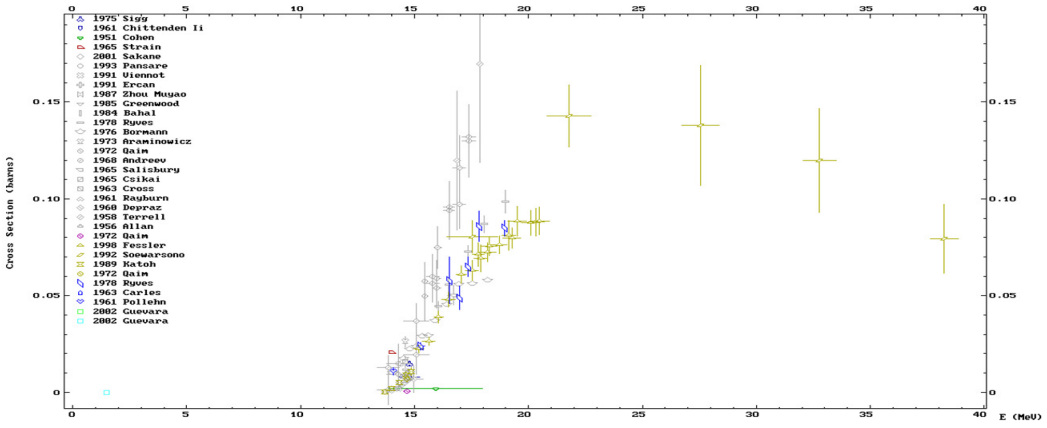


Figura 238. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,2n)26-Fe-53-M

[2] 26-Fe-54(n,3n)26-Fe52-G. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

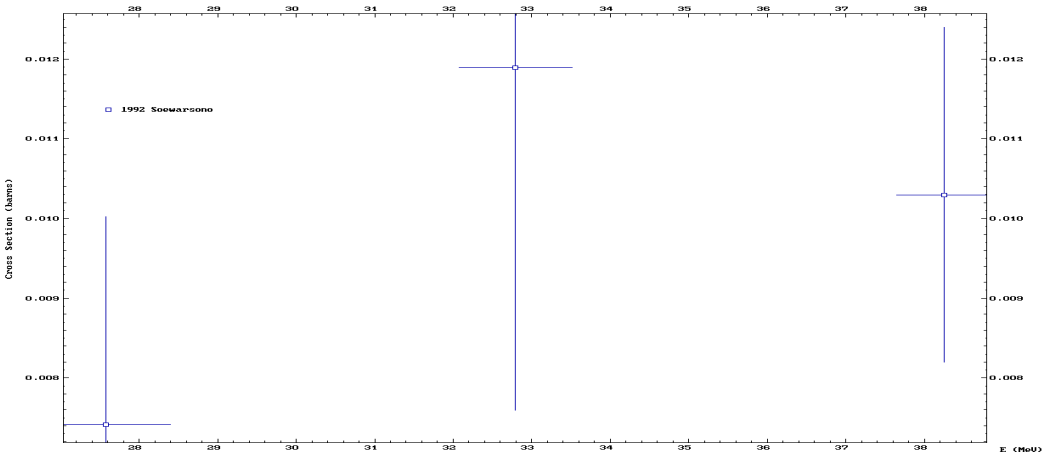


Figura 239. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,3n)26-Fe52-G

[3] 26-Fe-54(n,a)24-Cr-51. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces:

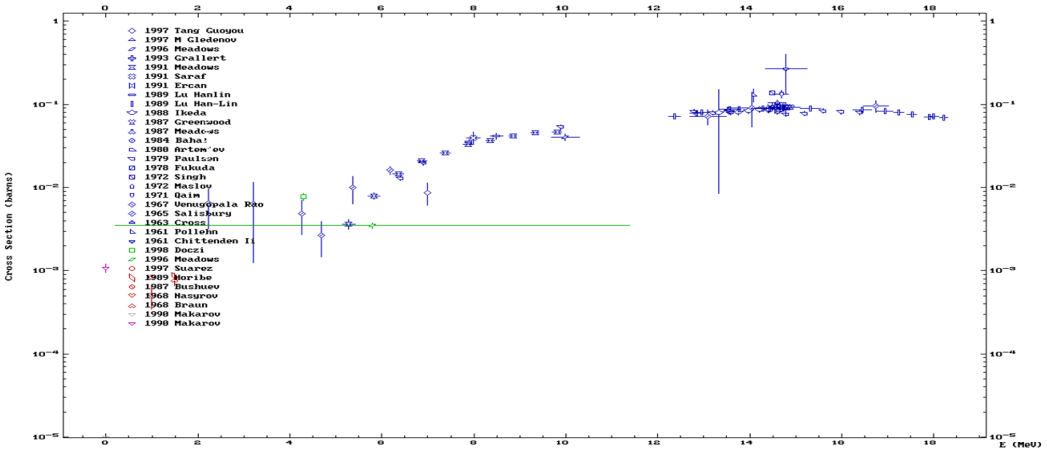


Figura 240. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,a)24-Cr-51

[4] 26-Fe-54(n,d)25-Mn-53 . Con las siguientes secciones eficaces:

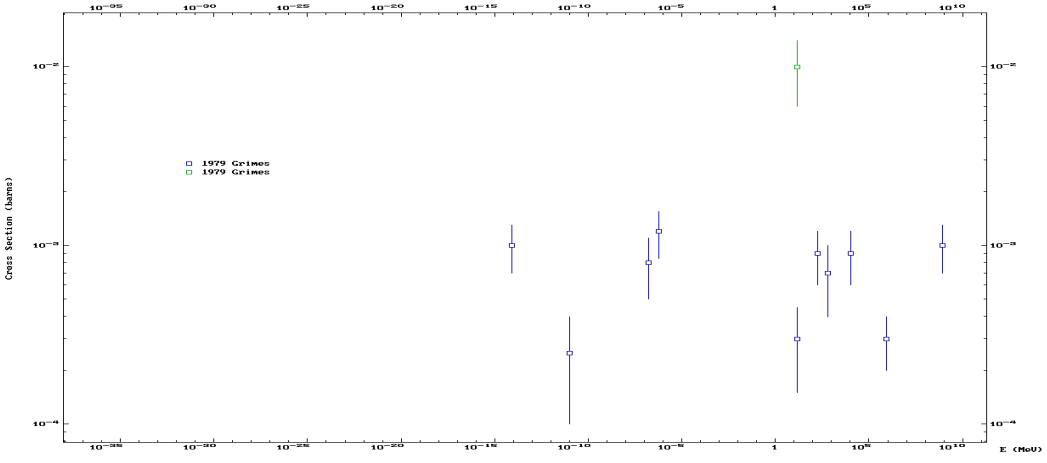


Figura 241. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,d)25-Mn-53

[5] 26-Fe-54(n,el)26-Fe-54. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

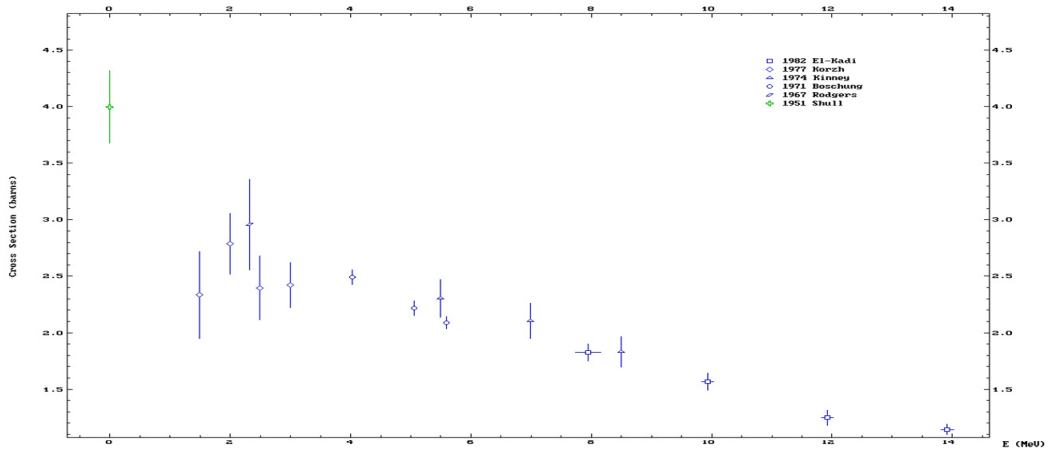


Figura 242. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,el)26-Fe-54

[6] 26-Fe-54(n,g)26-Fe55. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

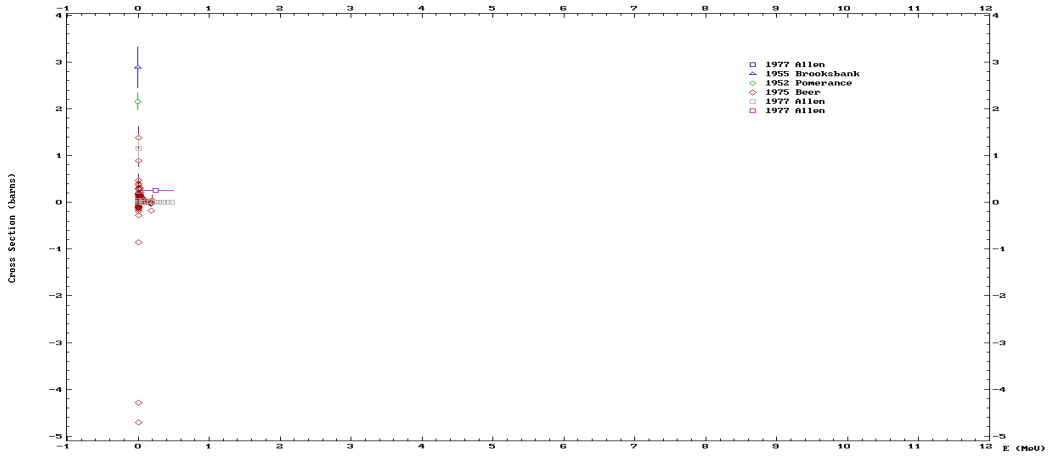


Figura 243. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,g)26-Fe55

[7] 26-Fe-54(n,inl)26-Fe54. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

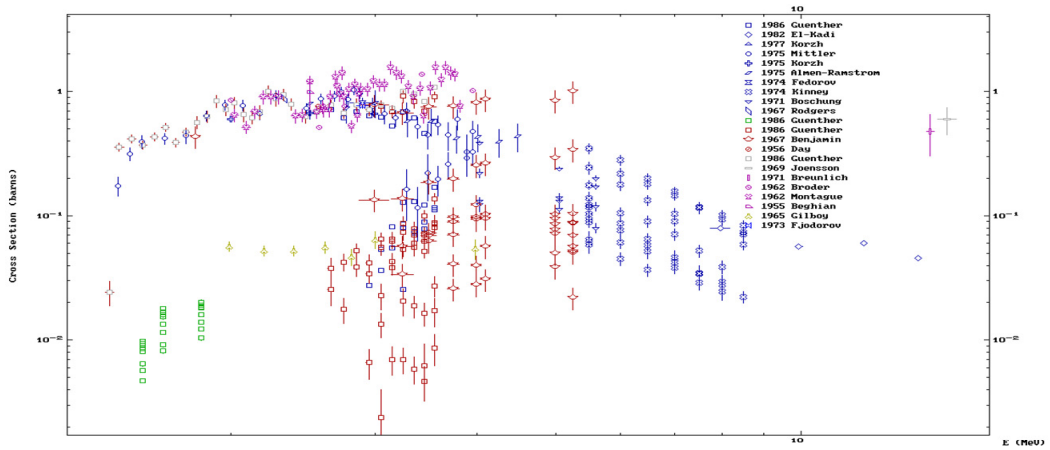


Figura 244. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,inl)26-Fe54

[8] 26-Fe-54(n,n+p)25-Mn-53. La sección eficaz es:

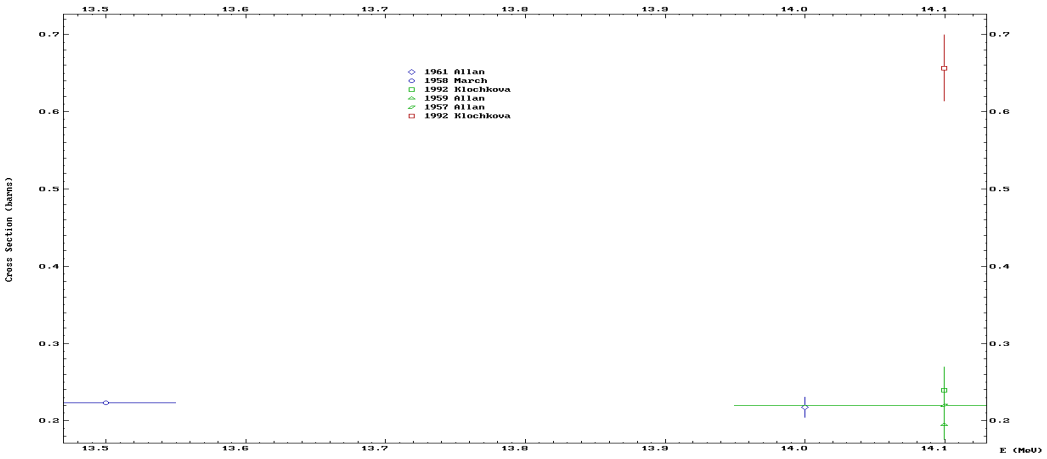


Figura 245. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,n+p)25-Mn-53

[9] 26-Fe-54(n,p)25-Mn-54. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces:

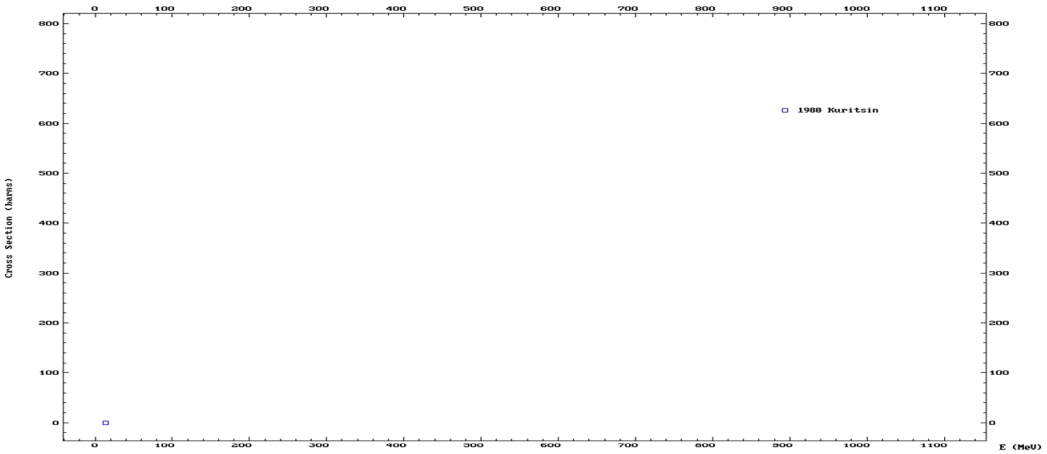


Figura 246. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,p)25-Mn-54

[10] 26-Fe-54(n,t)25-Mn-52-M. Con las siguientes secciones eficaces.

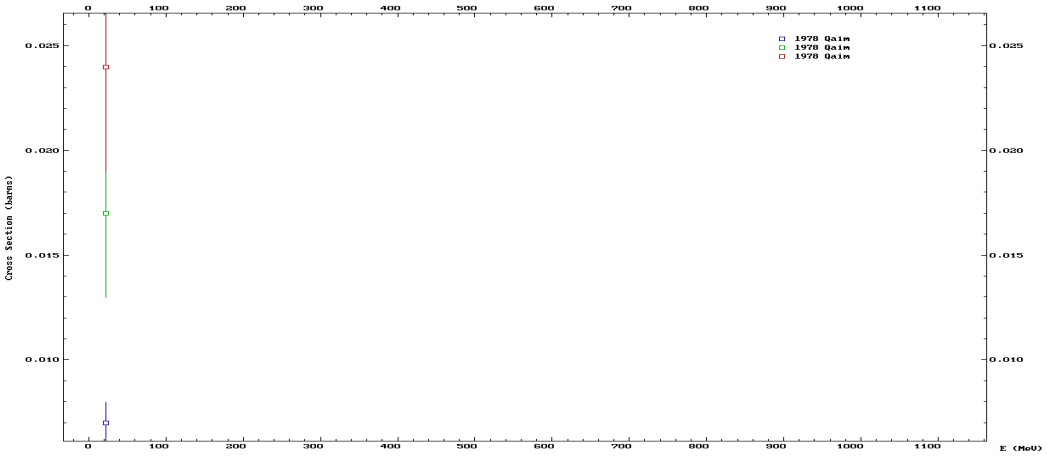


Figura 247. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,t)25-Mn-52-M

[11] 26-Fe-54(n,ths)26-Fe-54. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

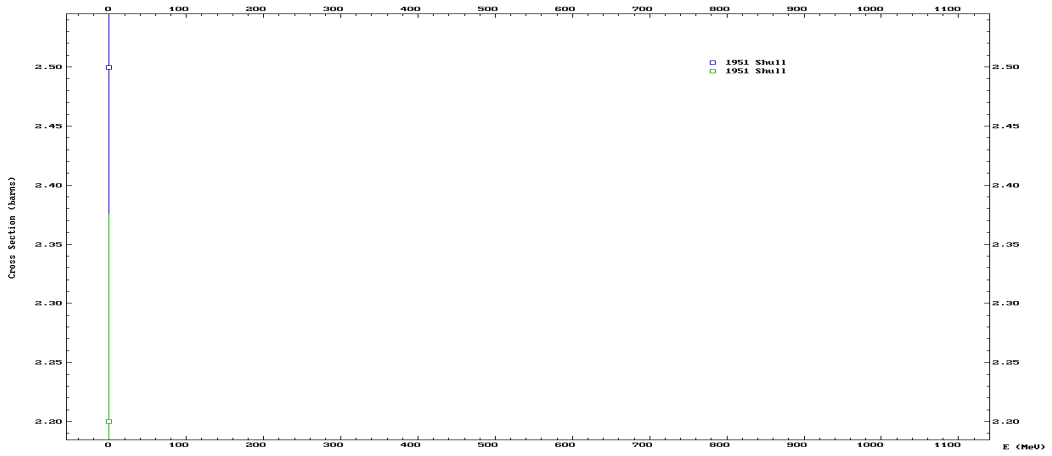


Figura 248. Sección eficaz de la reacción -Fe-54(n,ths)26-Fe-54

[12] 26-Fe-54(n,tot). Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

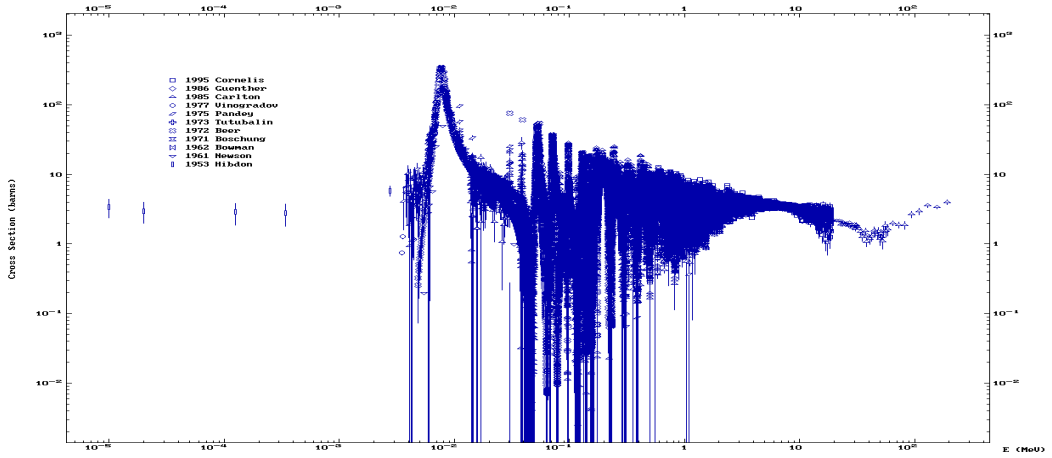


Figura 249. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,tot)

[13] 26-Fe-54(n,x)1-H-1 . Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

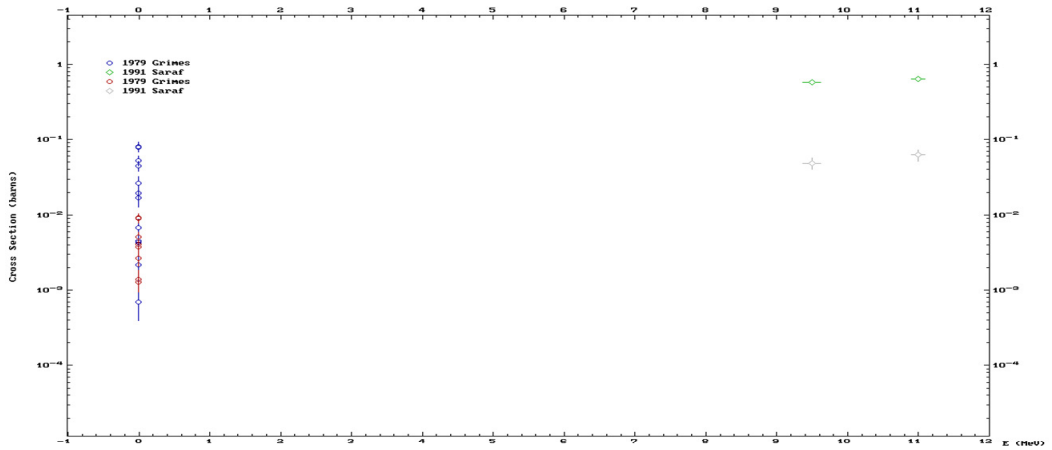


Figura 250. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-54(n,x)1-H-1

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 26Fe54 con los neutrones de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
26-Fe-54(n,a)24-Cr-51	En el rango de una fuente de americio berilio	Del orden de 0,05 mbarns	De Interés
26-Fe-54(n,d)25-Mn-53	En el rango	Milésimas de mbarns	Escaso interés

Tabla 94. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 26Fe54 con los neutrones.

5.7.1.1. Reacción 26-Fe-54(n,a)24-Cr-51.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{51}_{24}Cr$	0.0	7/2-	27.7010 d	ε: 100%	752.58	$^{51}_{23}V$

Tabla 95. Decaimiento del 24Cr51.

En el decaimiento de este elemento se producen las siguientes emisiones:

- Emisión de electrones:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	0,47	146,1	6,868E-4
Auger K	4,38	66,4	0,002907
CE K	314,6173	0,016481	5,185E-5
CE L	319,4542	0,0015190	4,853E-6
CE NP	320,0824	1,0226E-5	3,273E-8
CE M	320,0824	1,9956E-4	6,387E-7

Tabla 96. Emisión de electrones del decaimiento del 24Cr51.

- Emisión X y Gamma.

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	0,51	0,34	1,7E-6
XR kα2	4,945	6,5	3,22E-4
XR kα1	4,952	12,9	6,4E-4
XR kβ3	5,427	0,75	4,07E-5
XR kα1	5,427	1,46	7,9E-5
	320,0824	9,910	0,03172

Tabla 97. Emisión X y γ del 24Cr51.

5.7.2. Reacciones del 56Fe con los neutrones.

[1] 26-Fe-56(n,2n)26-Fe-55-M. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

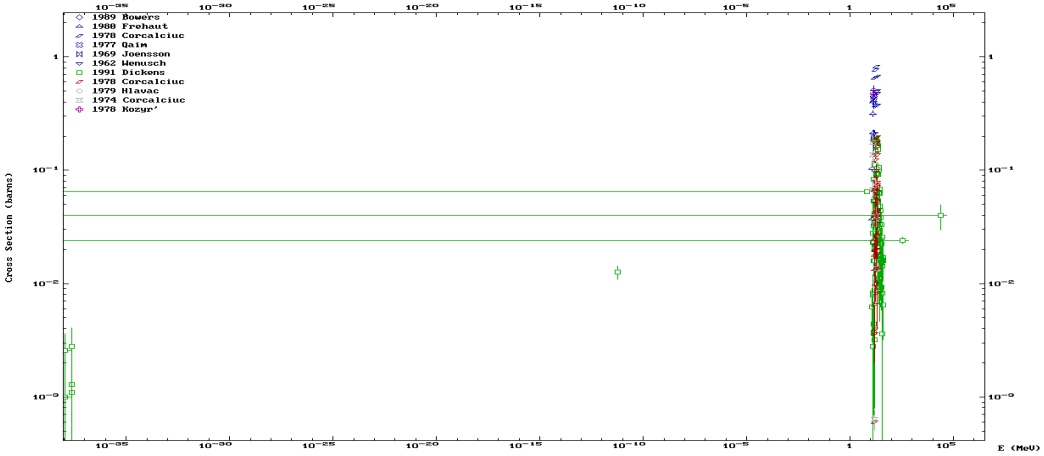


Figura 251. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,2n)26-Fe-55-M

[2] 26-Fe-56(n,3n)26-Fe-54. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

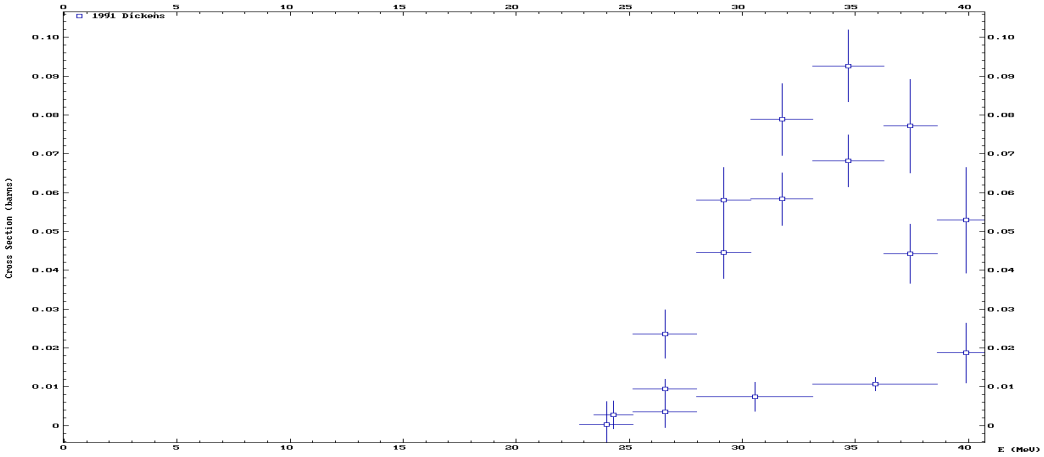


Figura 252. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,3n)26-Fe-54

[3] 26-Fe-56(N,4-Be-7)22-Ti-50. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

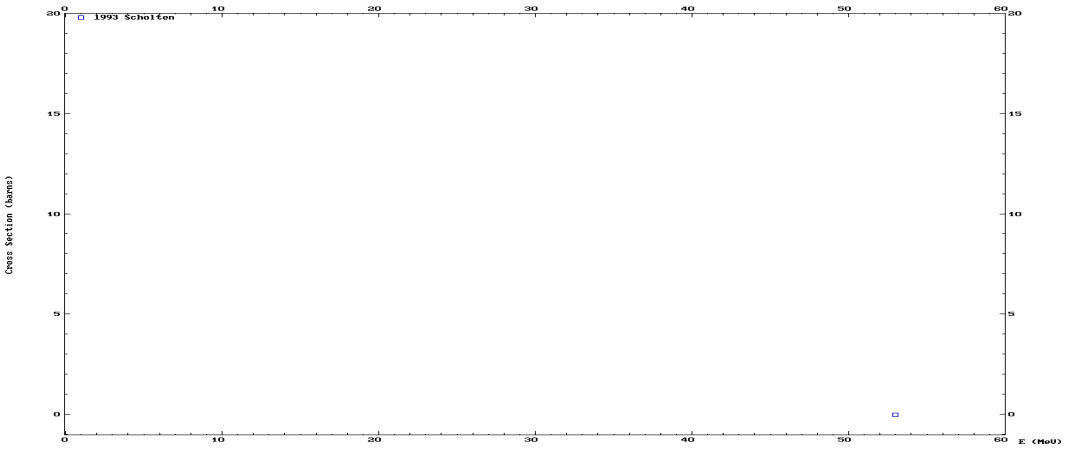


Figura 253. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(N,4-Be-7)22-Ti-50

[4] 26-Fe-56(n,α)24-Cr-53. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

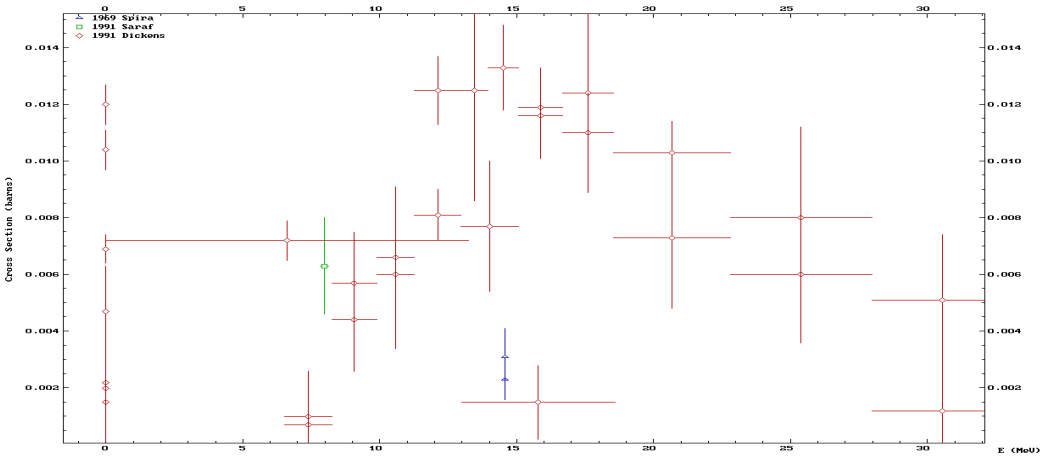


Figura 254. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,α)24-Cr-53

[5] 26-Fe-56(n,D)25-Mn-55. Con las siguientes secciones eficaces.

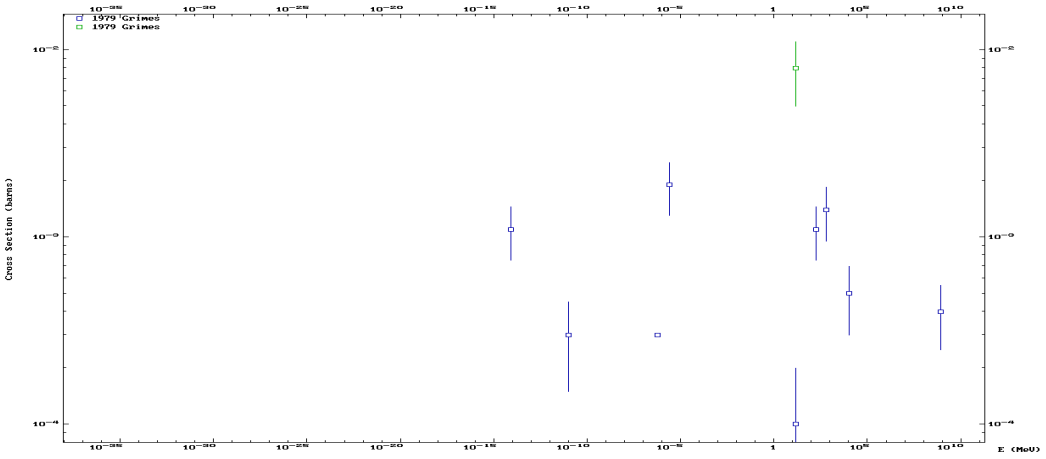


Figura 255. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,D)25-Mn-55

[6] 26-Fe-56(n,EL)26-Fe-56. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

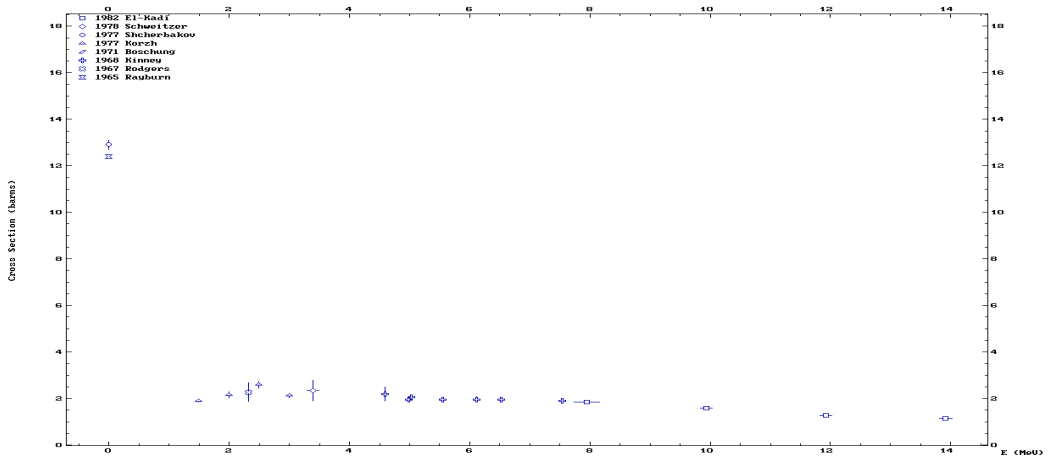


Figura 256. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,EL)26-Fe-56

[7] 26-Fe-56(n,g)26-Fe-57. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

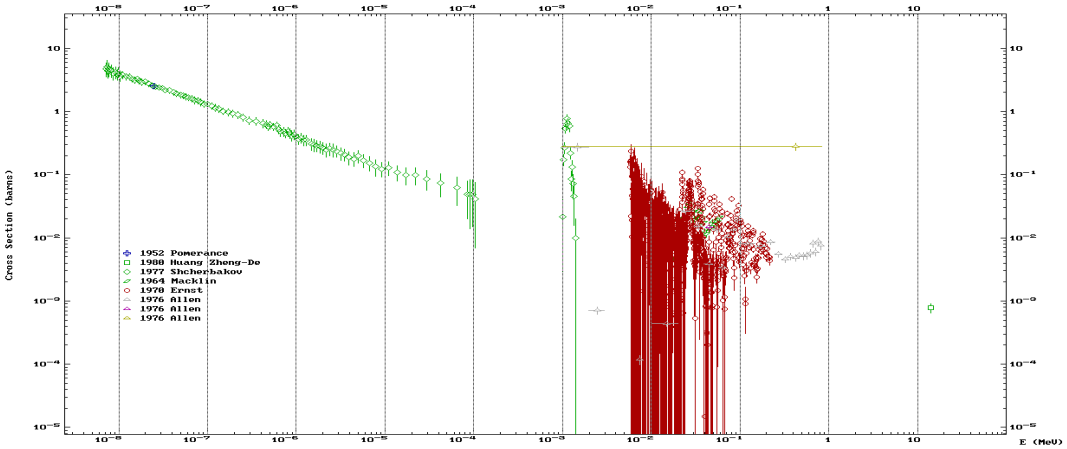


Figura 257. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,g)26-Fe-57

[8] 26-Fe-56(n,g+n)26-Fe-56. La sección eficaz es

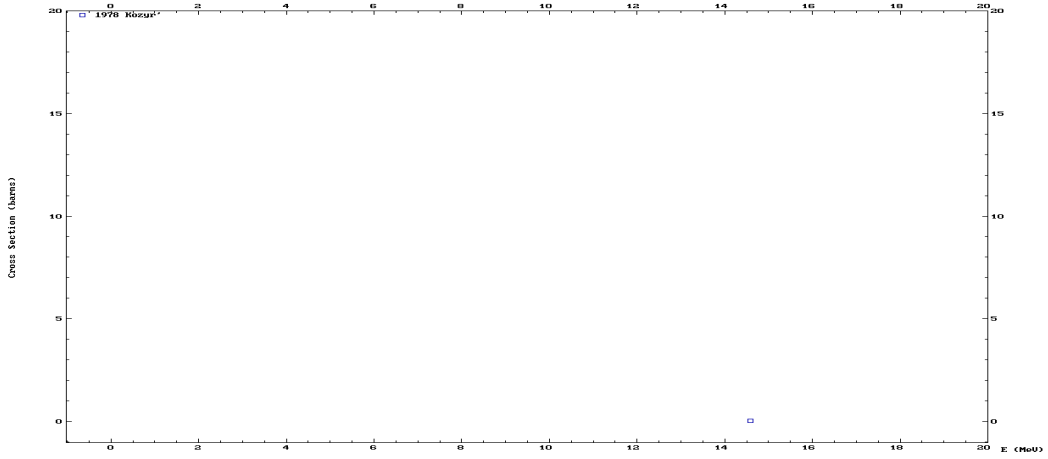


Figura 258. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,g+n)26-Fe-56

[9] 26-Fe-56(n,INL)26-Fe-56. La sección eficaz correspondiente es

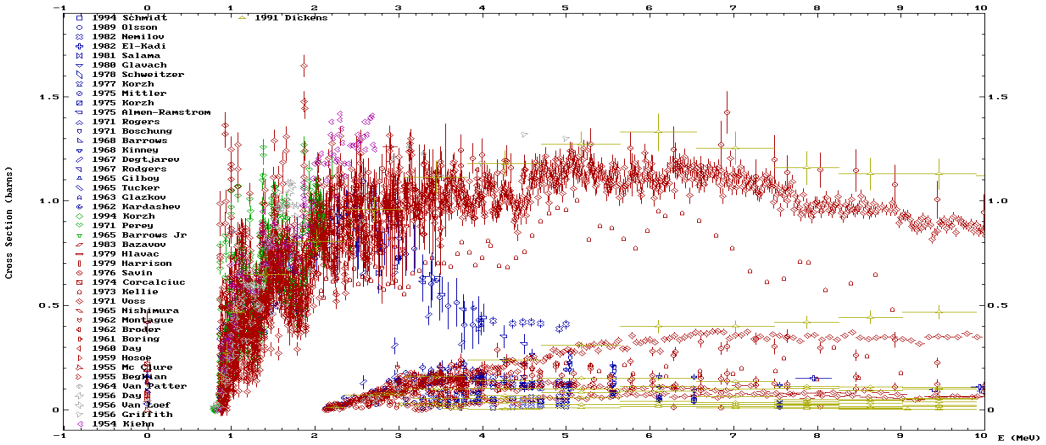


Figura 259. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,INL)26-Fe-56

[10] 26-Fe-56(n,n+α)24-Cr-52. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

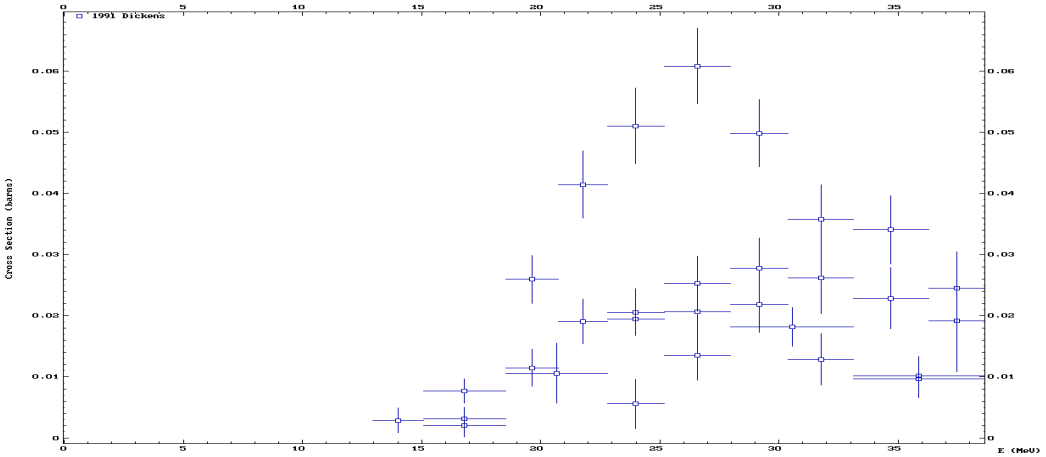


Figura 260. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,n+α)24-Cr-52

[11] 26-Fe-56(n,n+p)25-Mn-55. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

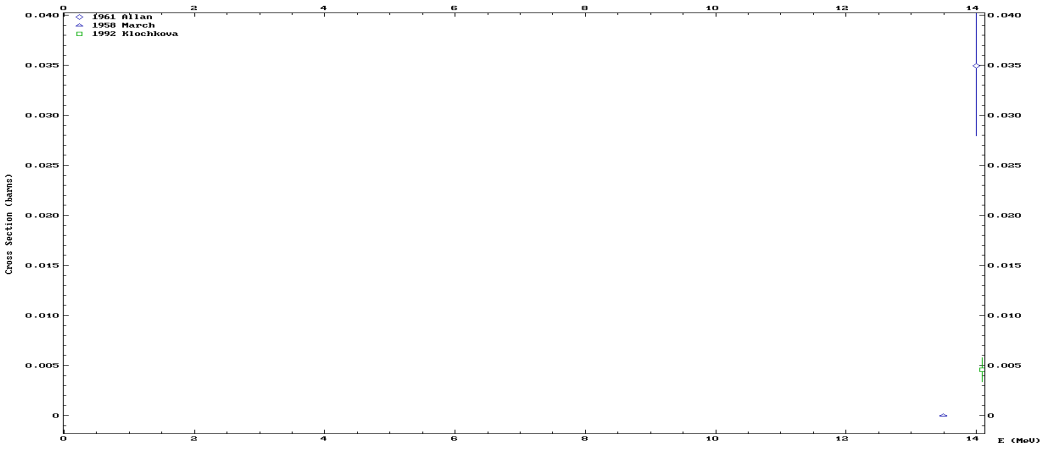


Figura 261. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,n+p)25-Mn-55

[12] 26-Fe-56(n,non). Sus secciones eficaces son:

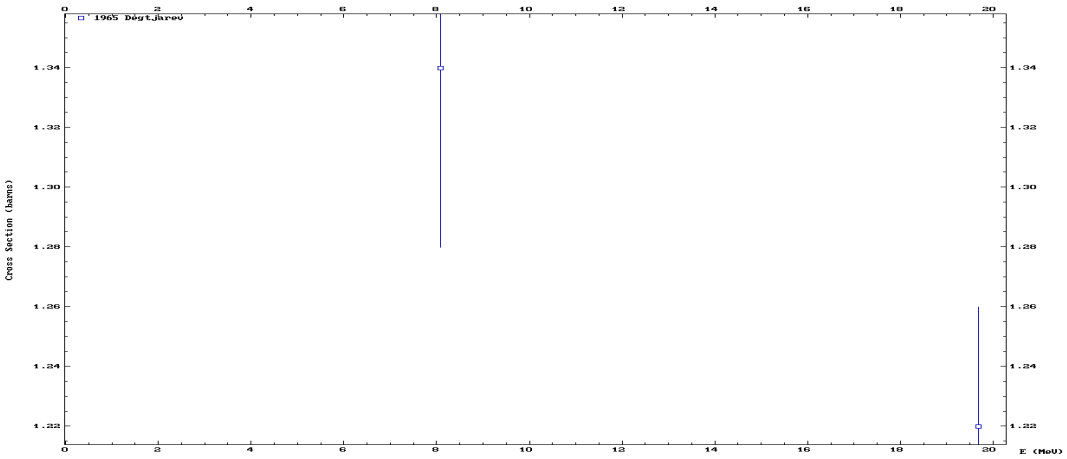


Figura 262. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,non)

[13] 26-Fe-56(n,p)25-Mn-56. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

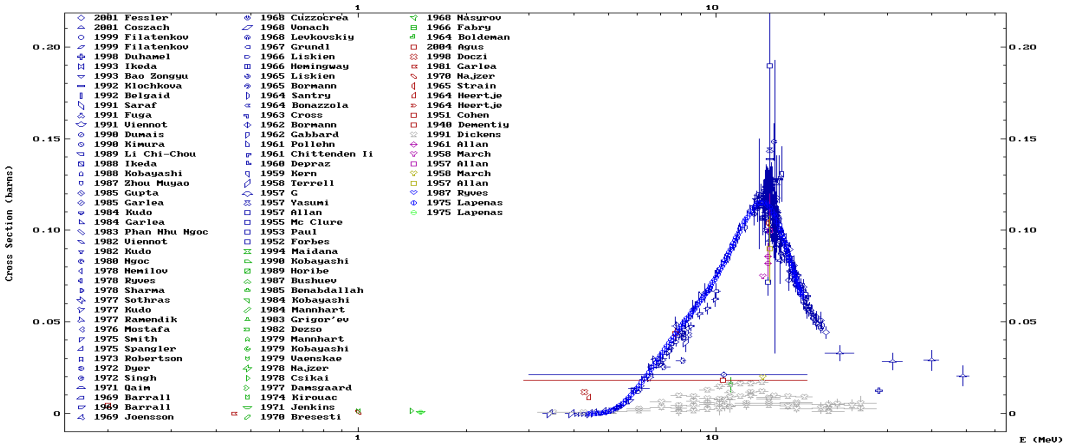


Figura 263. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,p)25-Mn-56

[14] 26-Fe-56(n,T)25-Mn-54. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

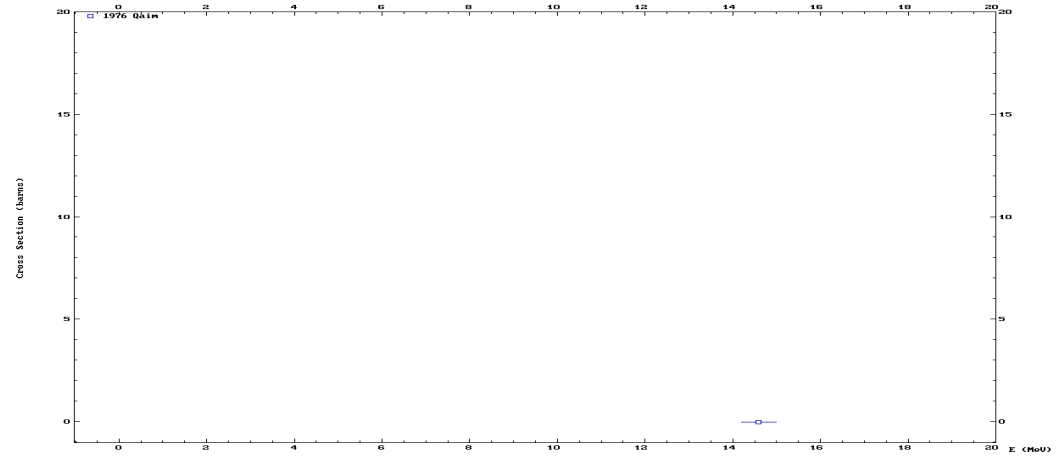


Figura 264. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,T)25-Mn-54

[15] 26-Fe-56(n,THS)26-Fe-56. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

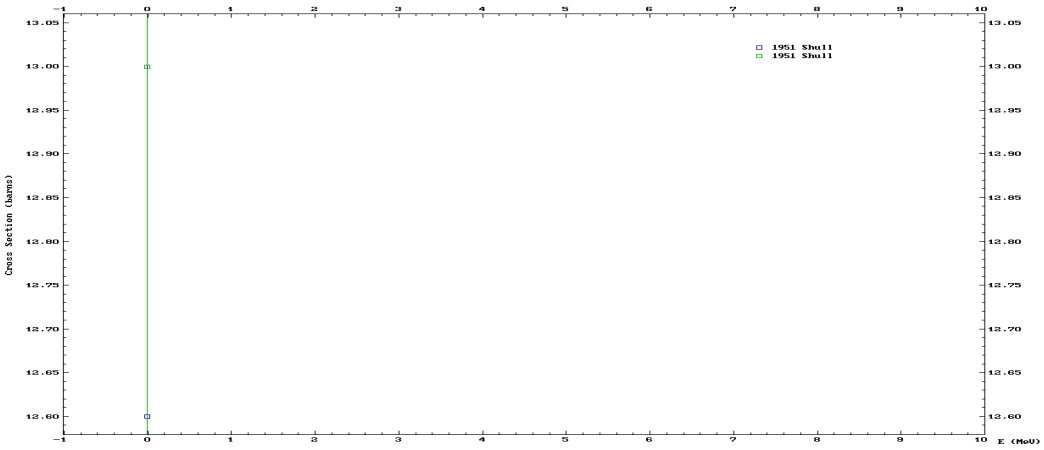


Figura 265. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,THS)26-Fe-56

[16] 26-Fe-56(n,TOT). Con las siguientes secciones eficaces.

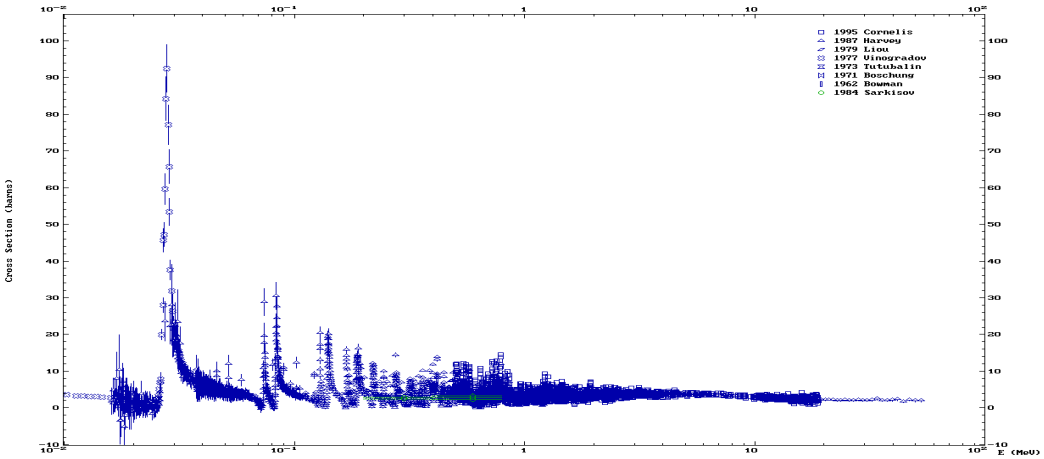


Figura 266. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,TOT)

[17] 26-Fe-56(n,2n)26-Fe-55-M. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

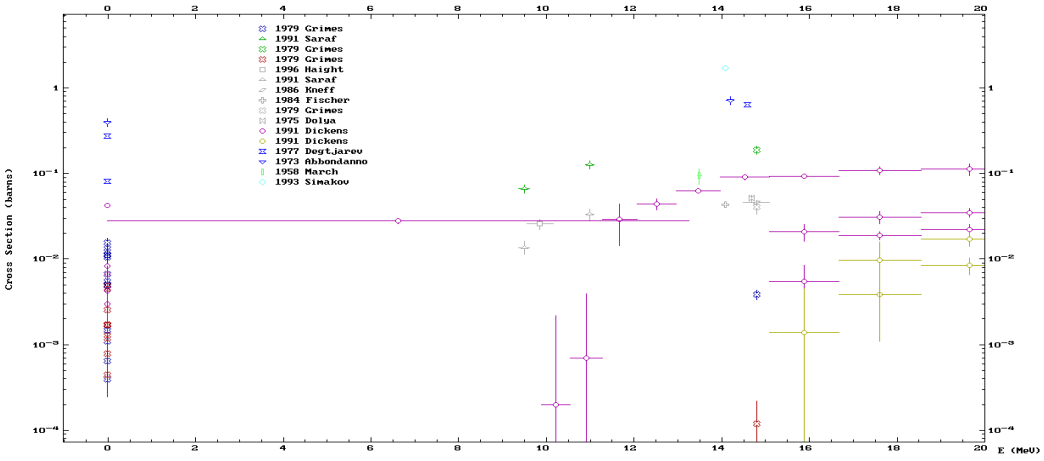


Figura 267. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-56(n,2n)26-Fe-55-M

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 54Fe con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
26-Fe-56(n,α)24-Cr-53	De 0 a 30 MeV	Menor que 0,008 en la zona d einterés	Poco interés
26-Fe-56(n,p)25-Mn-56	Amplio	Menor que 0,05 Barns en la zona de interés	Poco interés

Tabla 98. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 54Fe con los neutrones.

A la vista del poco interés no se continúa su estudio.

5.7.3. Reacciones del 56Fe con los neutrones.

[1] 26-FE-56(n,2n)26-FE-55. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

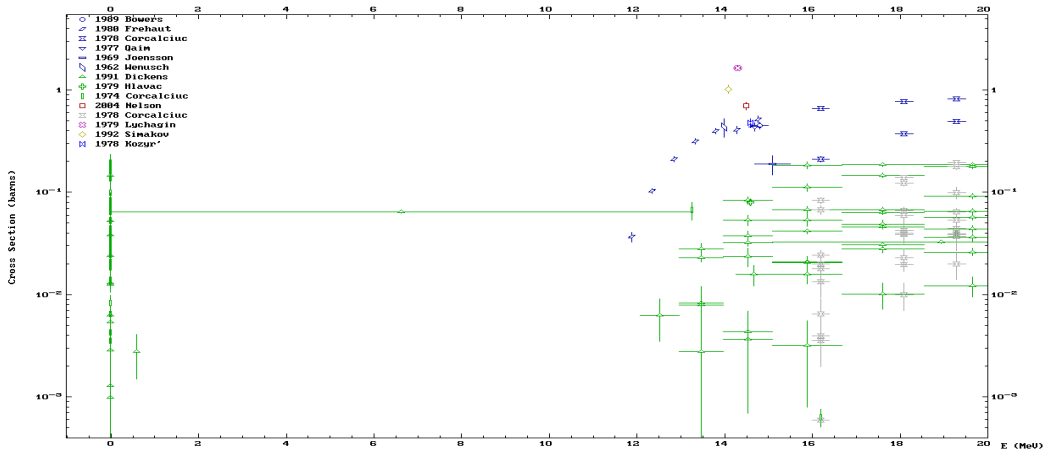


Figura 268. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,2n)26-FE-55.

[2] 26-FE-56(n,3n)26-FE-54. La sección eficaz es

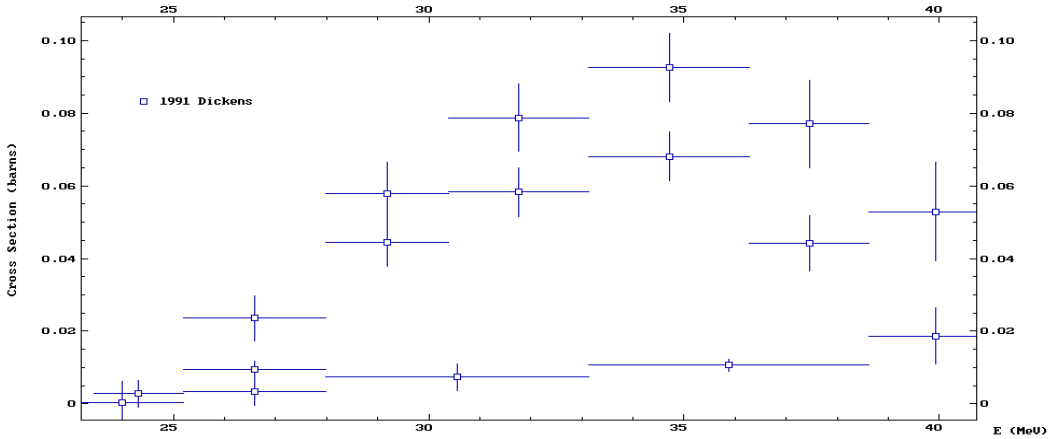


Figura 269. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,3n)26-FE-54

[3] 26-FE-56(N,4-BE-7)22-TI-50. La sección eficaz correspondiente es

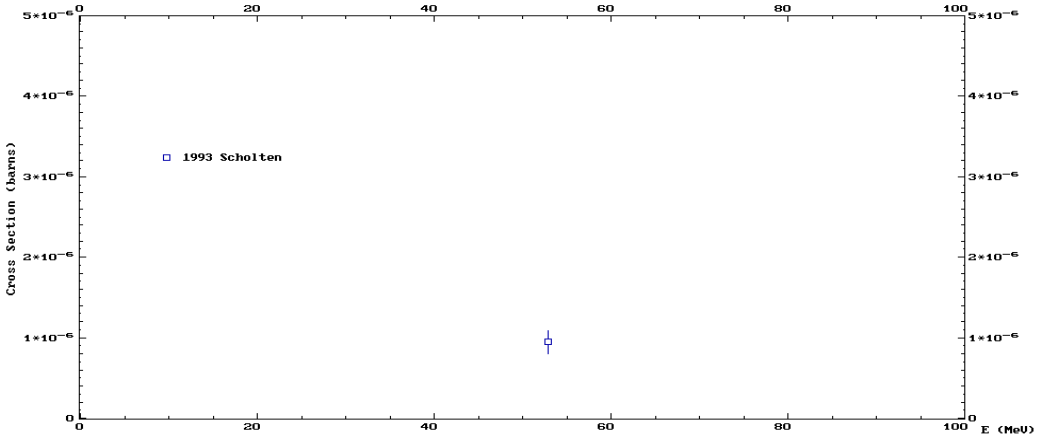


Figura 270. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(N,4-BE-7)22-TI-50

[4] 26-FE-56(n,α)24-CR-53. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

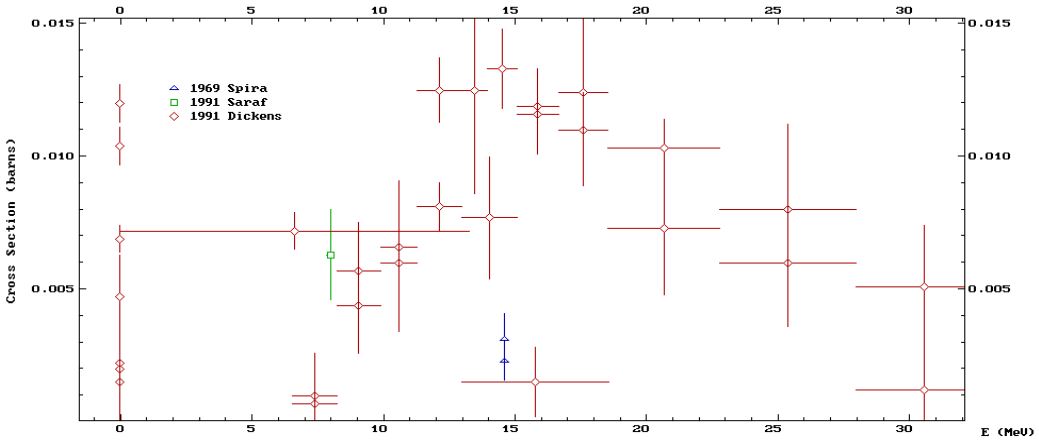


Figura 271. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,α)24-CR-53

[5] 26-FE-56(n,D)25-MN-55. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

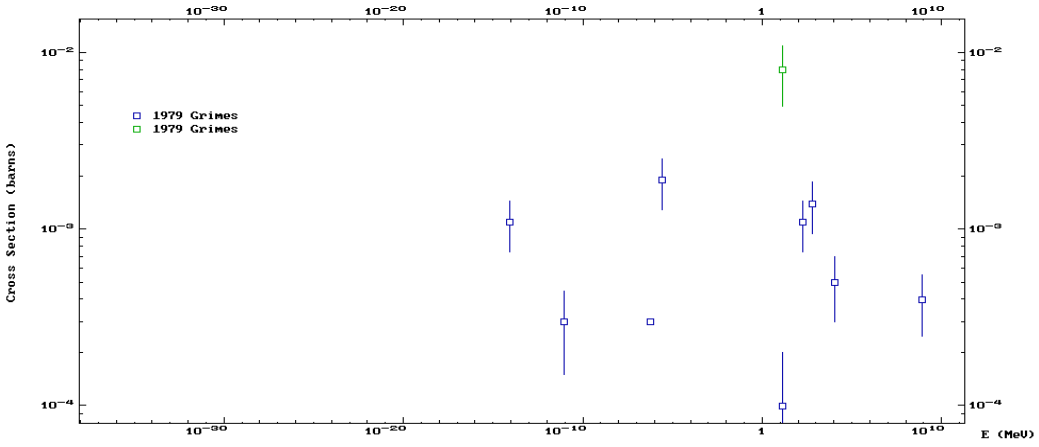


Figura 272. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,D)25-MN-55

[6] 26-FE-56(n,EL),, Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

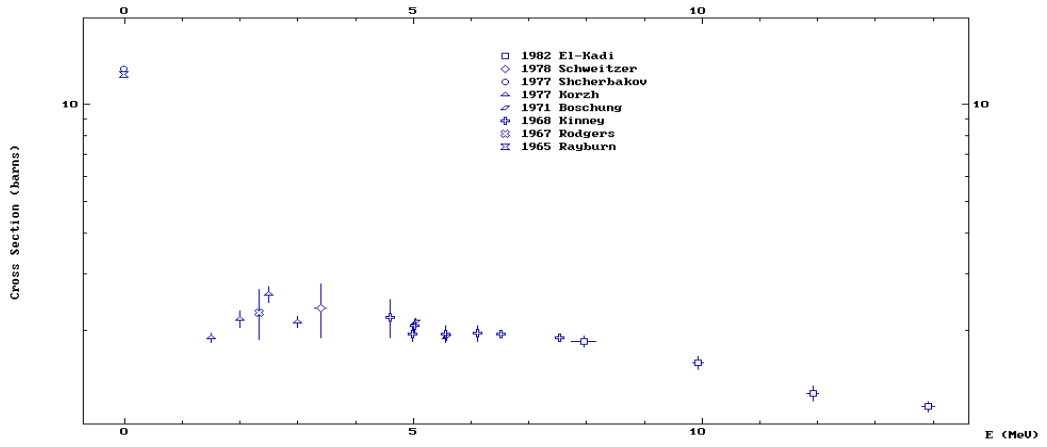


Figura 273. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,EL)

[7] 26-FE-56(n,g)26-FE-57. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

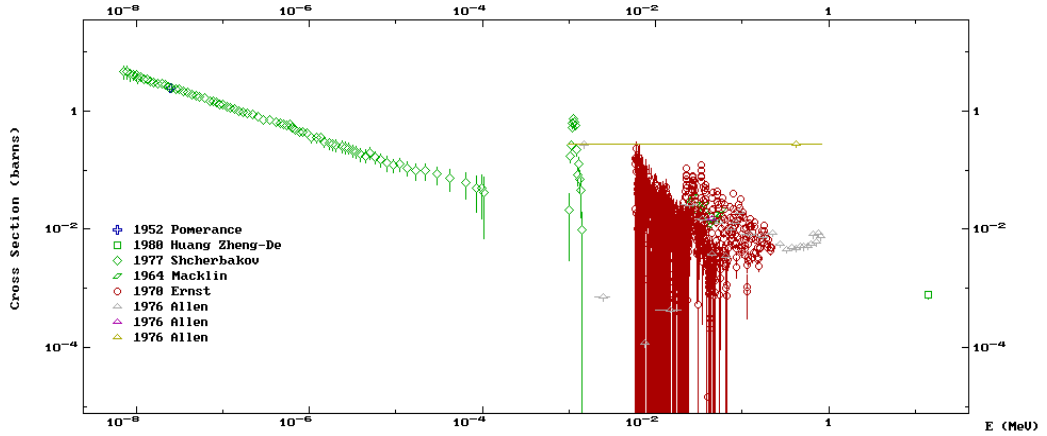


Figura 274. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,g)26-FE-57

[8] 26-FE-56(n,g+n)26-FE-56. Sus secciones eficaces son:

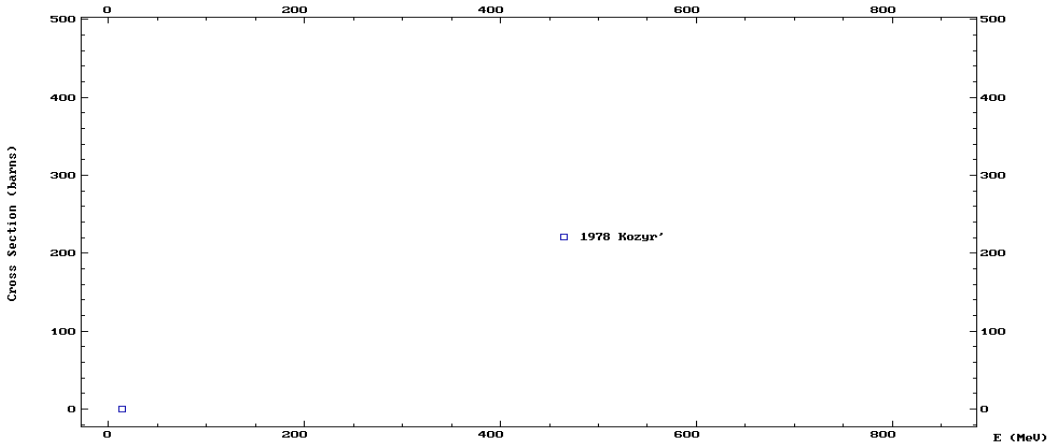


Figura 275. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,g+n)26-FE-56

[9] 26-FE-56(n,INL)26-FE-56. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

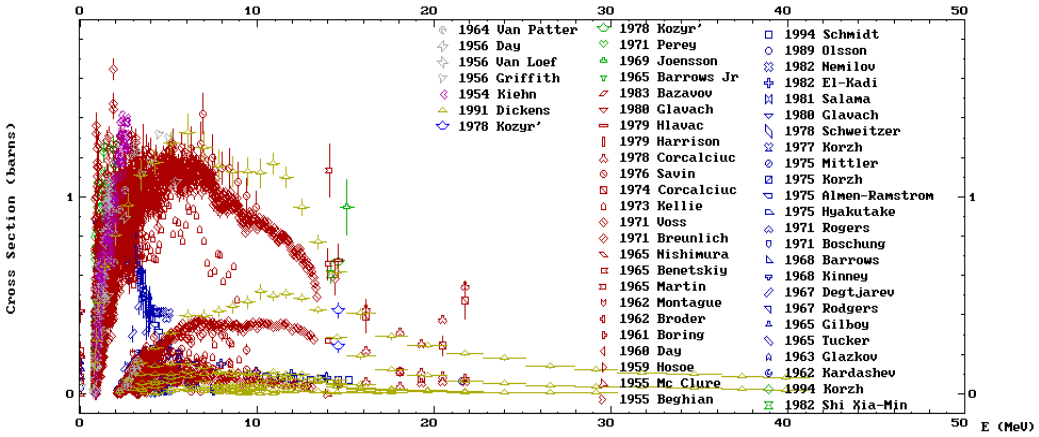


Figura 276. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,INL)26-FE-56

[10] 26-FE-56(n,n+α)24-CR-52. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

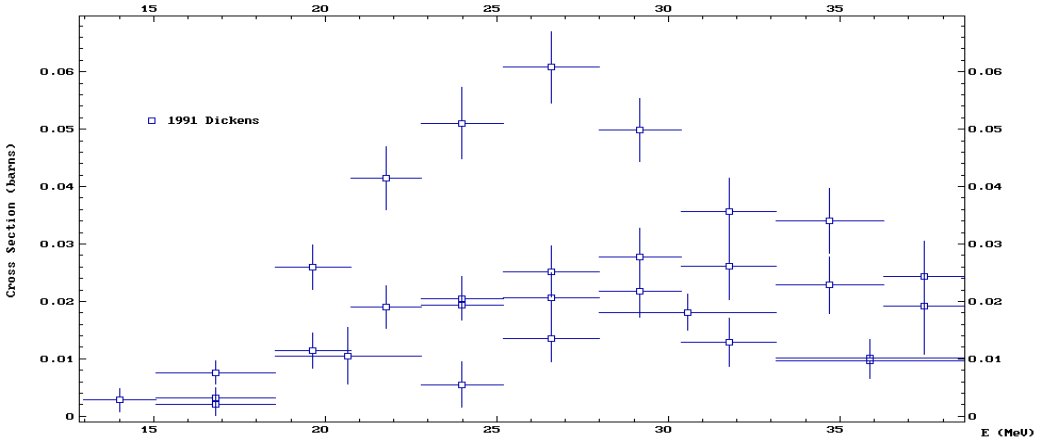


Figura 277. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,n+α)24-CR-52

[11] 26-FE-56(n,n+p)25-MN-55. Con las siguientes secciones eficaces.

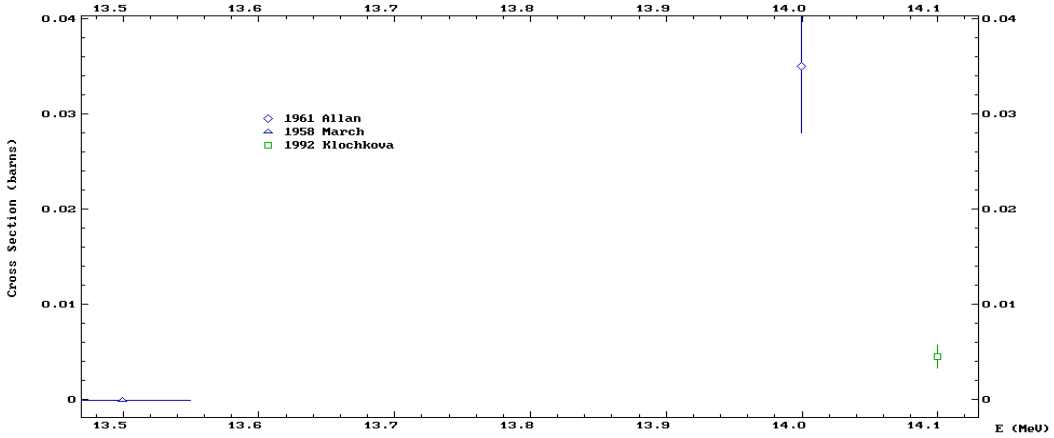


Figura 278. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,n+p)25-MN-55

[12] 26-FE-56(n,non),, Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces:

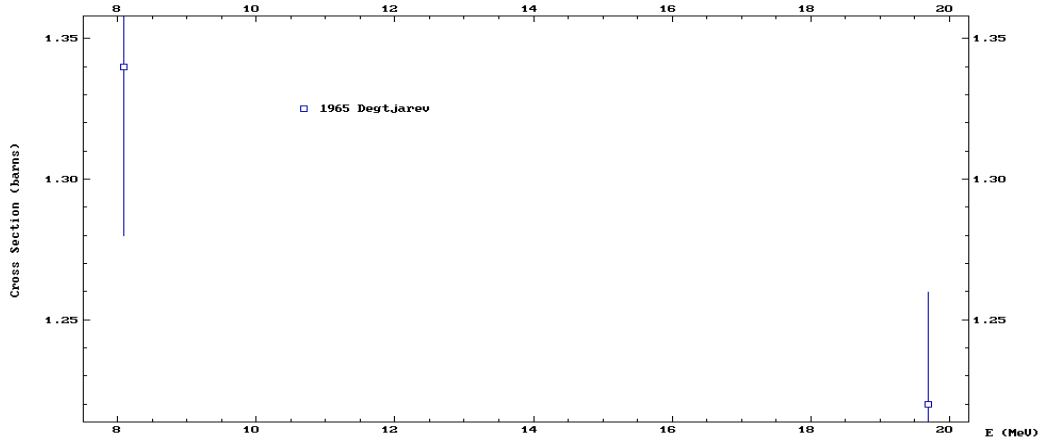


Figura 279. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,non)

[13] 26-FE-56(n,p)25-MN-56. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

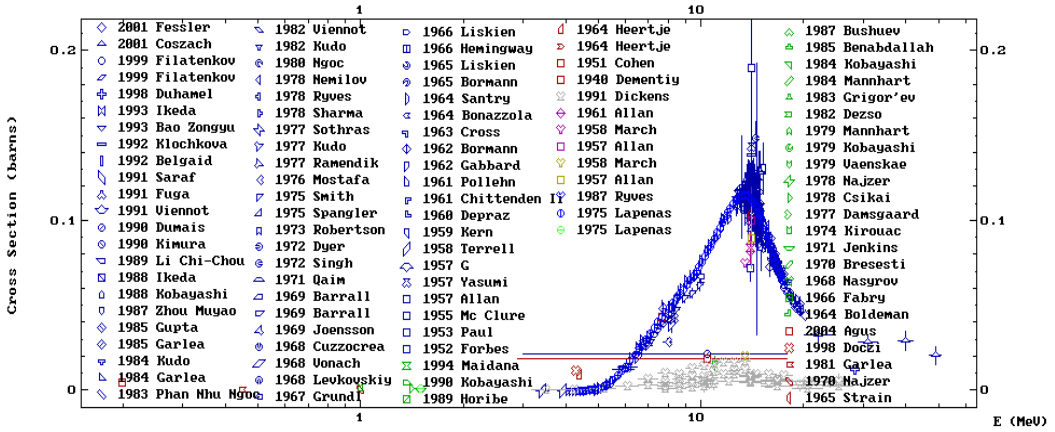


Figura 280. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,p)25-MN-56

[14] 26-FE-56(n,T)25-MN-54. La sección eficaz es

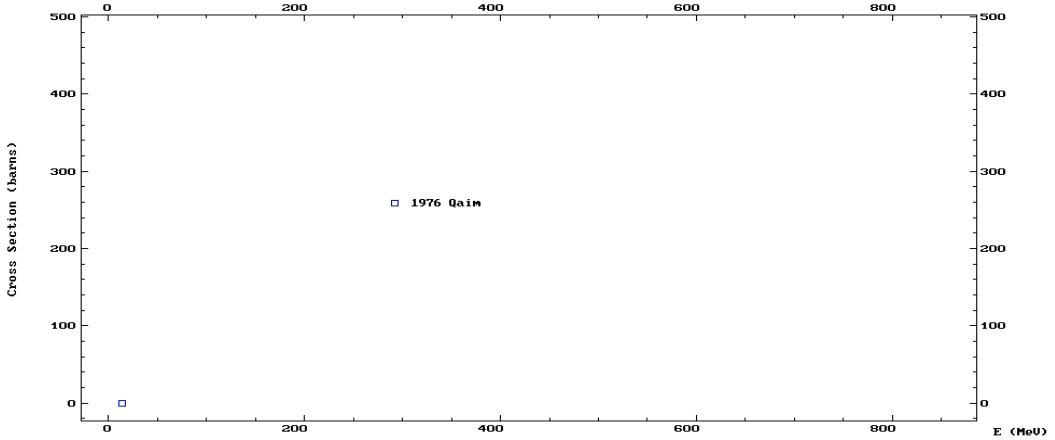


Figura 281. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,T)25-MN-54

[15] 26-FE-56(n,THS)26-FE-56. La sección eficaz correspondiente es

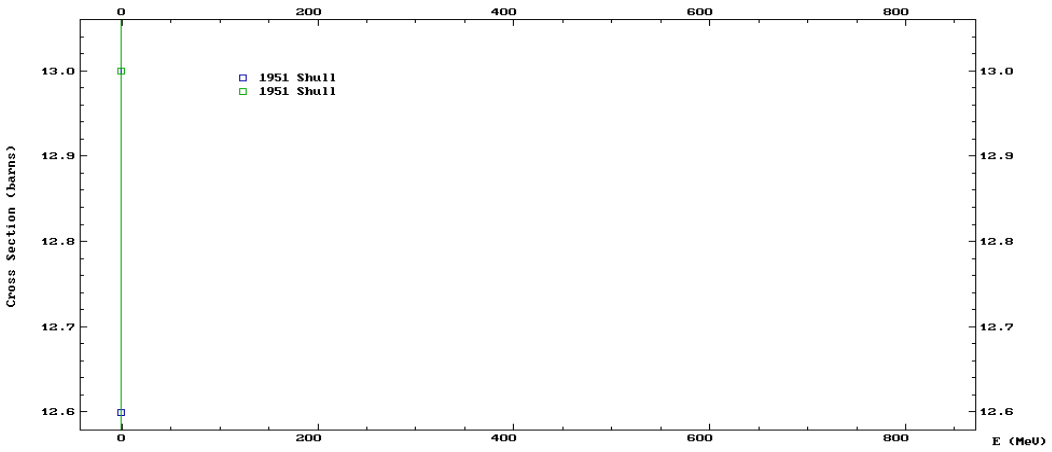


Figura 282. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,THS)26-FE-56.

[16] 26-FE-56(n,TOT),, Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

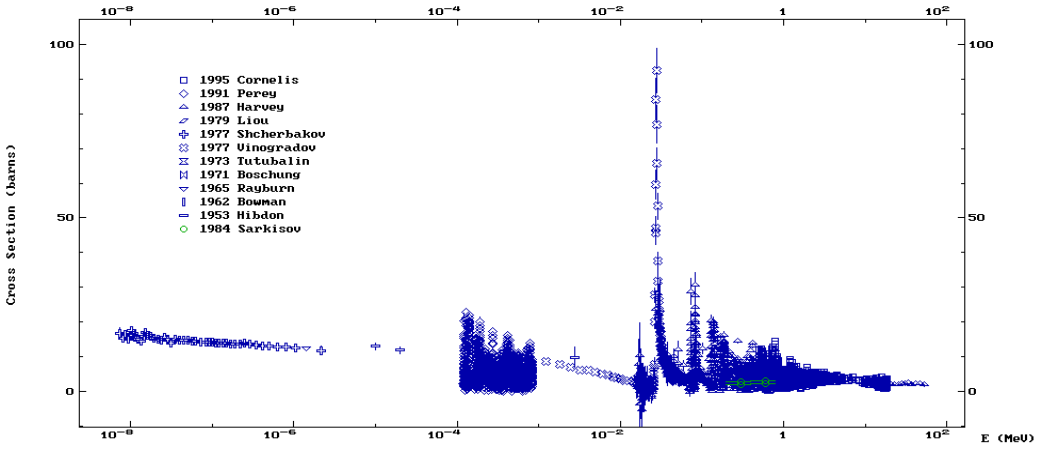


Figura 283. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(n,TOT).

[17] 26-FE-56(N,X)0-G-0. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

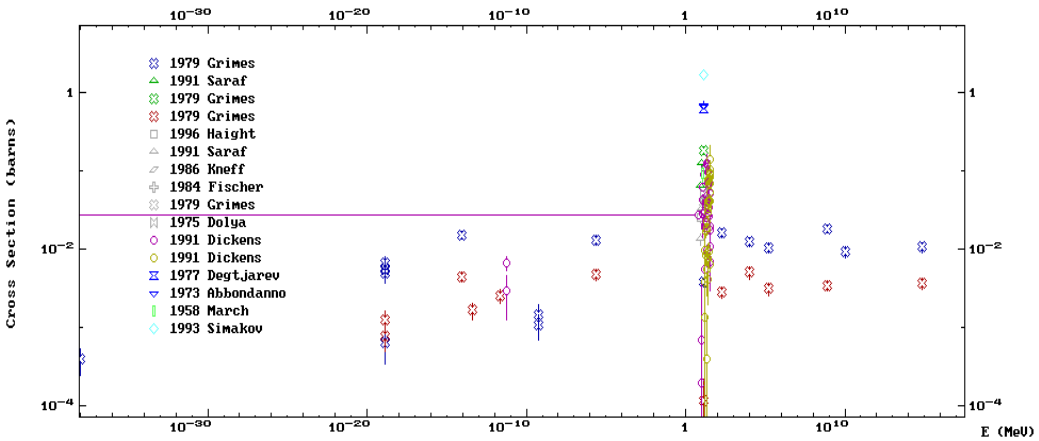


Figura 284. Sección eficaz de la reacción 26-FE-56(N,X)0-G-0.

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 56Fe con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
26-FE-56(n,2n)26-FE-55	Variado	Menor de 0,1 Barn en el rango de activación de la Fuente	Muy poco interés
26-FE-56(n,α)24-CR-53	Hasta 30 MeV	Menor de 0,01 Barn en el rango de la fuente	Poco interés
26-FE-56(n,D)25-MN-55	Muy amplio	Menor de 0,01 Barns en el rango de la fuente	Poco interés
26-FE-56(n,g)26-FE-57	Hasta 2 MeV	Menor de 0,001 Barns en el rango de la fuente	Muy poco interés
26-FE-56(n,p)25-MN-56	De 4 a 12 MeV	Menor que 0,2 Barns en el rango de la fuente	De interes

Tabla 99. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 56Fe con los neutrones.

5.7.3.1. Reacción 26-FE-56(n,2n)26-FE-55.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{55}_{26}Fe$	0.0	3/2-	2.737 y	ε: 100 %	231.38	$^{55}_{25}Mn$

Tabla 100. Decaimiento del 26Fe55.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión de electrones:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	0,61	139,9	8,53E-4 *8*
Auger K	5,19	60,1	0,00312 *4*

Tabla 101. Emisión de electrones del 26-Fe55

- Radiación γ y X.

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	0,64	0,66	4,2E-6
XR kα2	5,888	8,2	4,85E-4
XR kα1	5,899	16,2	9,6E-4
XR kβ3	6,49	0,9	6,3E-5
XR kβ1	6,49	1,89	1,23E-4
	126,0	1,280E-7	1,61E-10

Tabla 102. Emisión X y γ del 26Fe55.

5.7.3.2. Reacción 26-FE-56(n,p)25-MN-56.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{56}_{25}Mn$	0.0	3+	2.5789 h *1*	β^-: 100 %	3695.5	$^{56}_{26}Fe$

Tabla 103. Decaimiento del 25Mn56.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
73,6	250,3	0,0188	1,38E-5
99,2	325,8	1,16	0,00115
190,5	572,6	0,040	7,6E-5
255,3	735,6	14,6	0,0373
382,0	1038,0	27,9	0,107
636,4	1610,5	0,059	3,8E-4
1216,9	2848,7	56,3	0,685

Tabla 104. Emisión β de decaimiento del 25Mn56.

- Emisión γ y X:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
846,754	98,9	0,837
1037,818	0,040	4,1E-4
1238,25	0,09	0,00122
1810,72	27,2	0,492
2113,0	14,3	0,303
2522,88	0,9	0,0249
2598,40	0,0188	4,9E-4
2657,45	0,653	0,0173
2959,77	0,306	0,0091
3369,60	0,16	0,0057

Tabla 105. Emisión X y γ de 25Mn56.

5.7.4. Reacciones del 57Fe con los neutrones.

[1] 26-Fe-57(n,n+p)25-Mn-56.

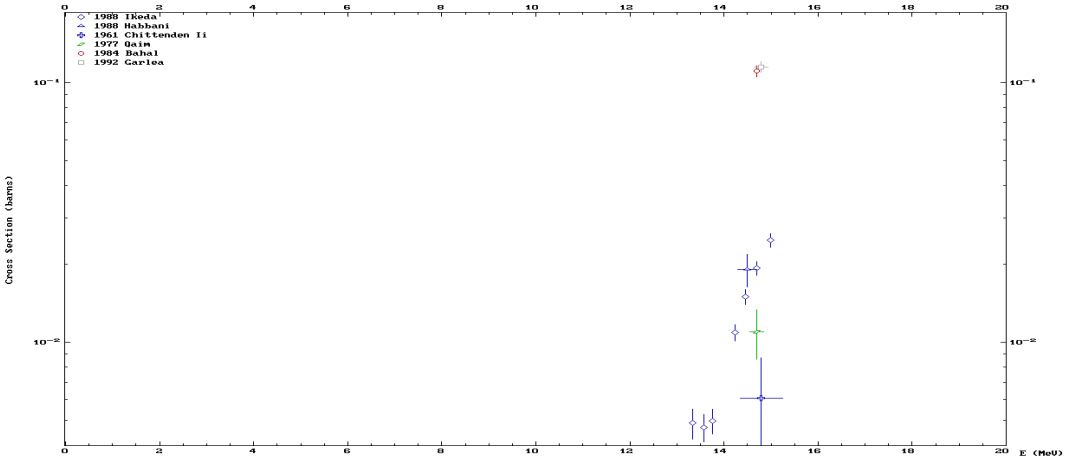


Figura 285. Sección eficaz de la reacción

[2] 26-Fe-57(n,g)26-Fe-58.

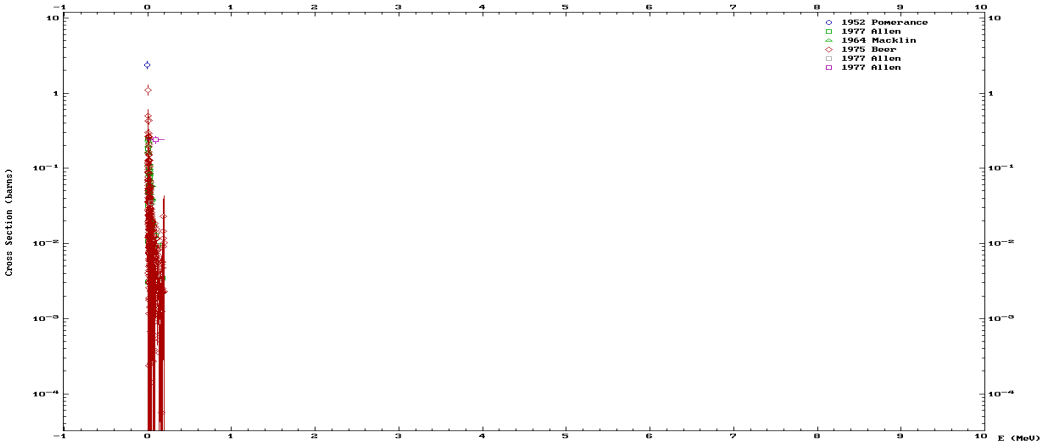


Figura 286. Sección eficaz de la reacción

[3] 26-Fe-57(n,INL)26-Fe-57.

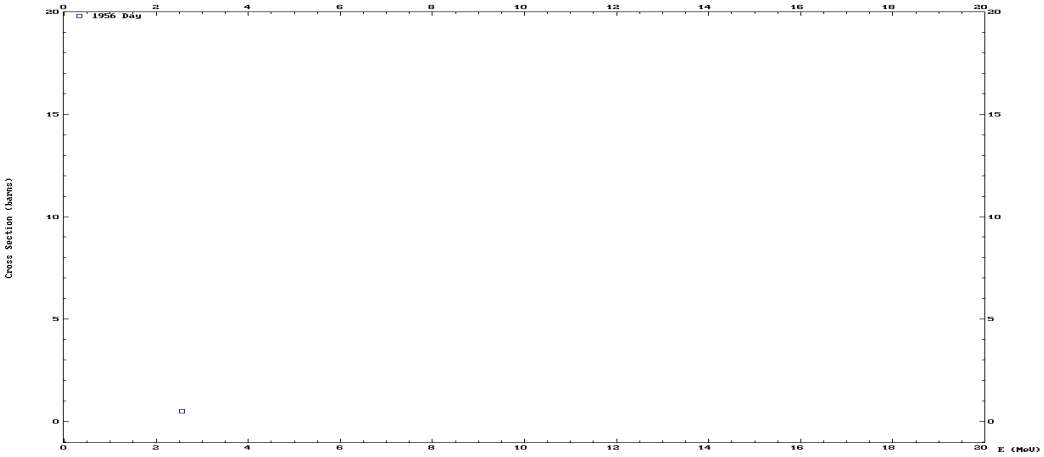


Figura 287. Sección eficaz de la reacción

[4] 26-Fe-57(n,p)25-Mn-57.

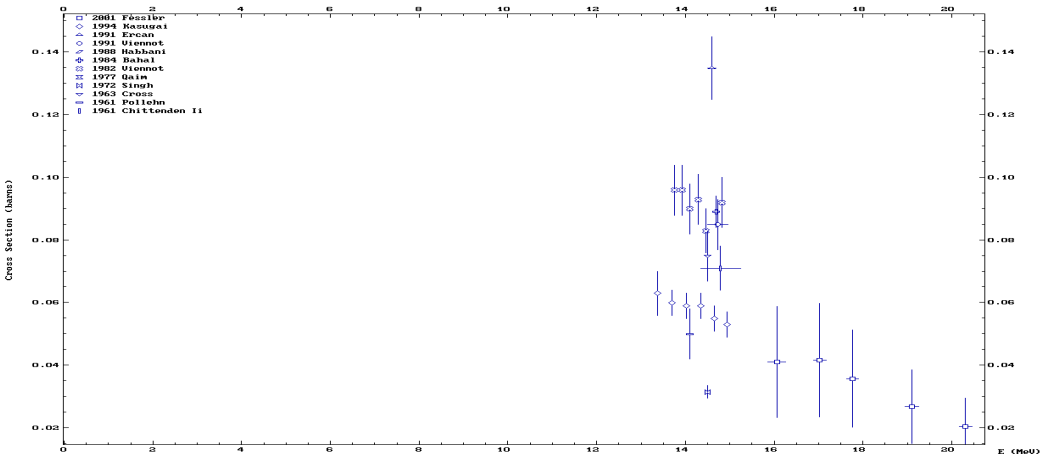


Figura 288. Sección eficaz de la reacción

[5] 26-Fe-57(n,THS)26-Fe-57.

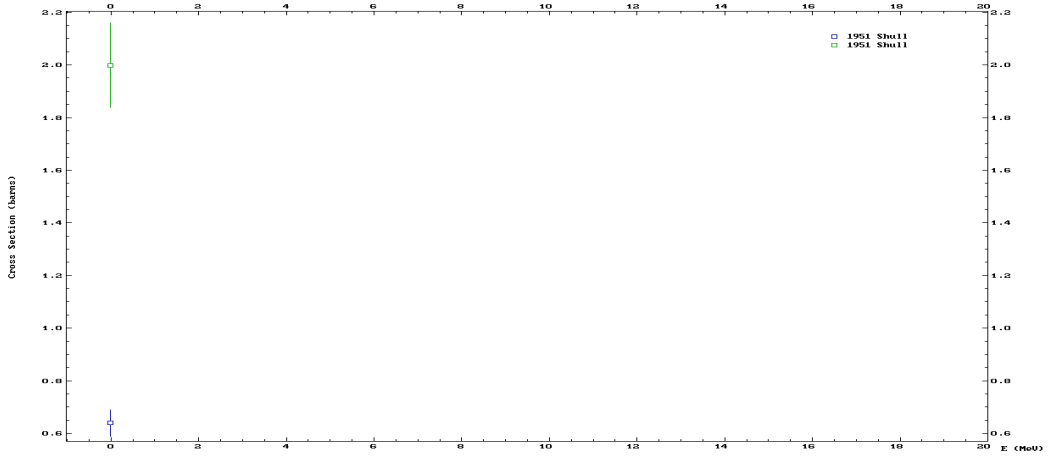


Figura 289. Sección eficaz de la reacción

[6] 26-Fe-57(n,TOT).

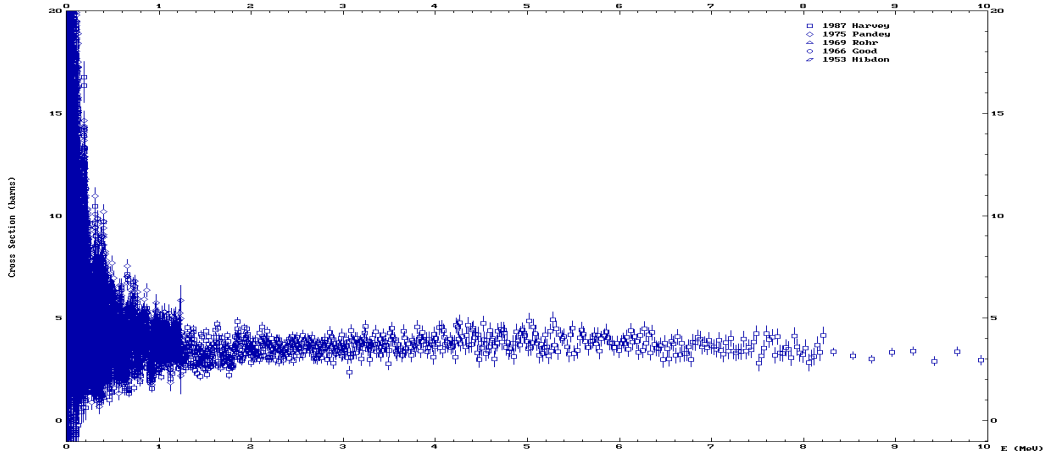


Figura 290. Sección eficaz de la reacción

[7] 26-Fe-57(N,X)2-He-4.

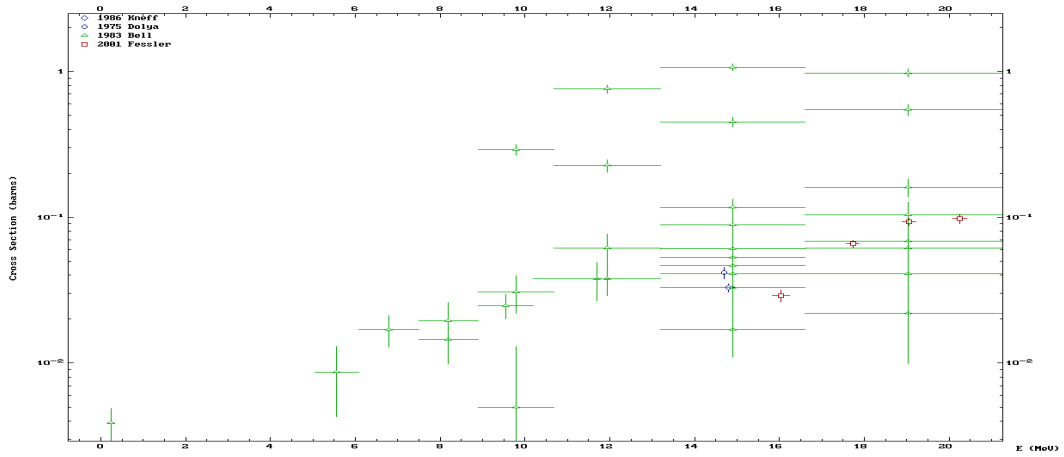


Figura 291. Sección eficaz de la reacción 26-Fe-57(N,X)2-He-4

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 57Fe con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
26-Fe-57(N,X)2-He-4	Dentro del rango de la fuente	Inferior a 0,05 Barn	Sin interés

Tabla 106. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 57Fe con los neutrones.

5.7.5. Conclusiones de las reacciones del Hierro con los neutrones.

Del análisis del hierro se concluye que solo puede producir emisión γ el 24Cr51 procedente de la reacción 26-Fe-54(n,a)24-Cr-51, así como el 26Fe55 y el 25Mn56 procedentes de las reacciones del 26Fe56, con los neutrones, pero sus niveles de energía son inferiores al nivel originado en la activación del flúor.

5.8. Estudio del fósforo.

Los isótopos del fósforo se indican en la tabla siguiente:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{31}P	100	30,9737620	1/2	--	estable
^{32}P	0	31,9739	1	14,28d	β^-
^{33}P	0	32,9717	1/2	24,3d	β^-

Tabla 107 Isótopos del fósforo.

5.8.1. Reacciones del 31P con los neutrones.

Estudiaremos pues, las reacciones de los neutrones con el P31.

[1] 15-P-31(N,2A)11-NA-24. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

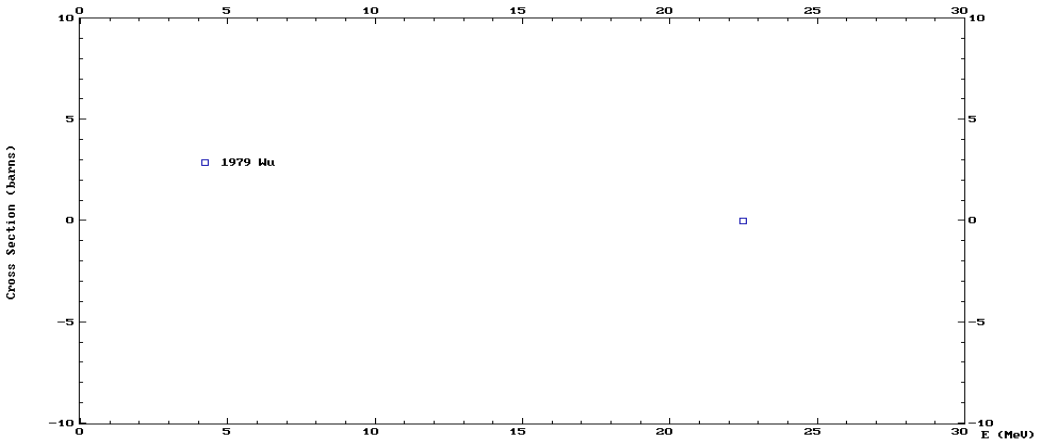


Figura 292. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(N,2A)11-NA-24.

[2] 15-P-31(n,2n)15-P-30 Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

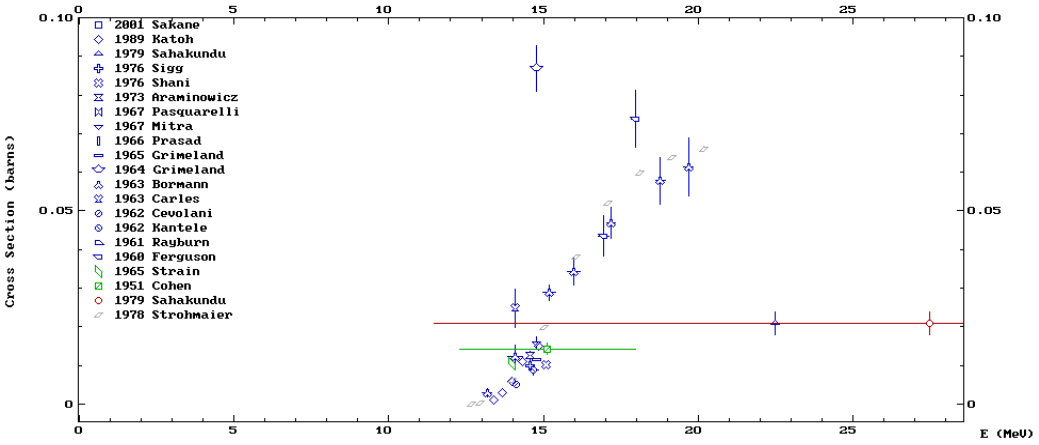


Figura 293. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,2n)15-P-30

[3] 15-P-31(n,α)13-AL-28. Sus secciones eficaces son:

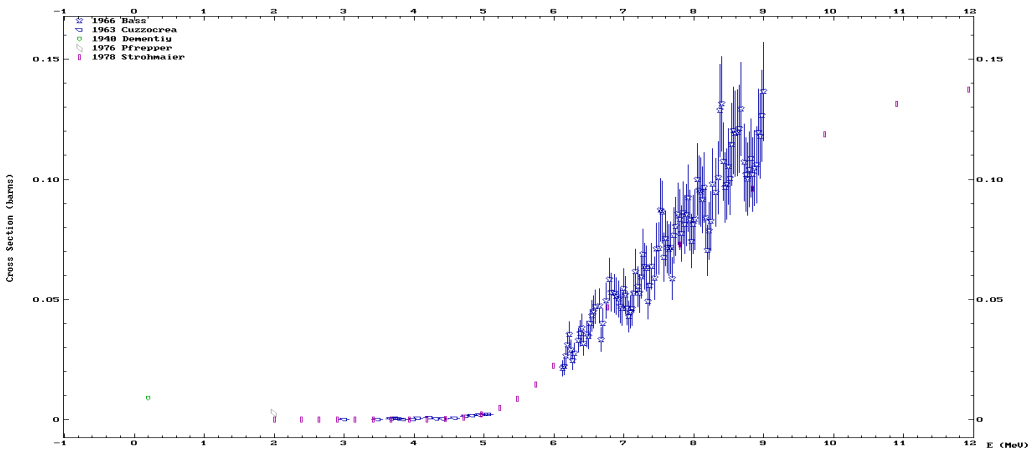


Figura 294. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,α)13-AL-28

[4] 15-P-31(n,α+X), Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

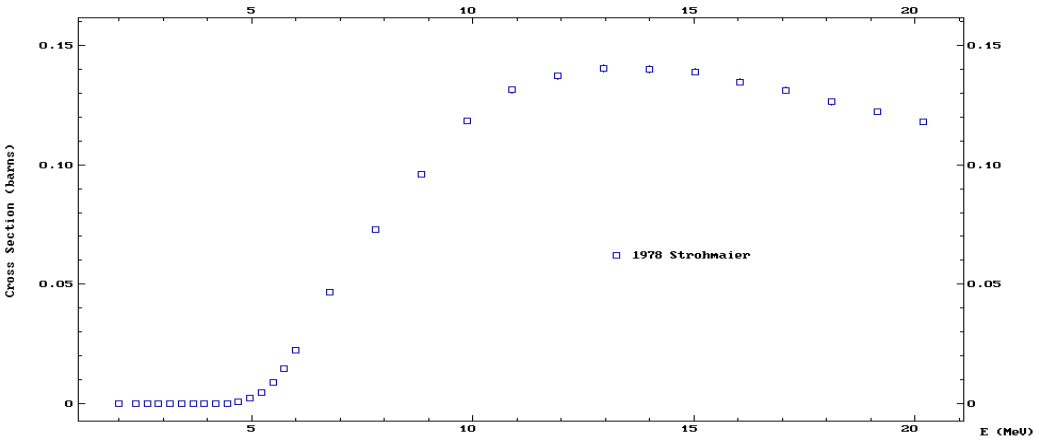


Figura 295. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,α+X)

[5] 15-P-31(n,α+n)13-AL-27. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

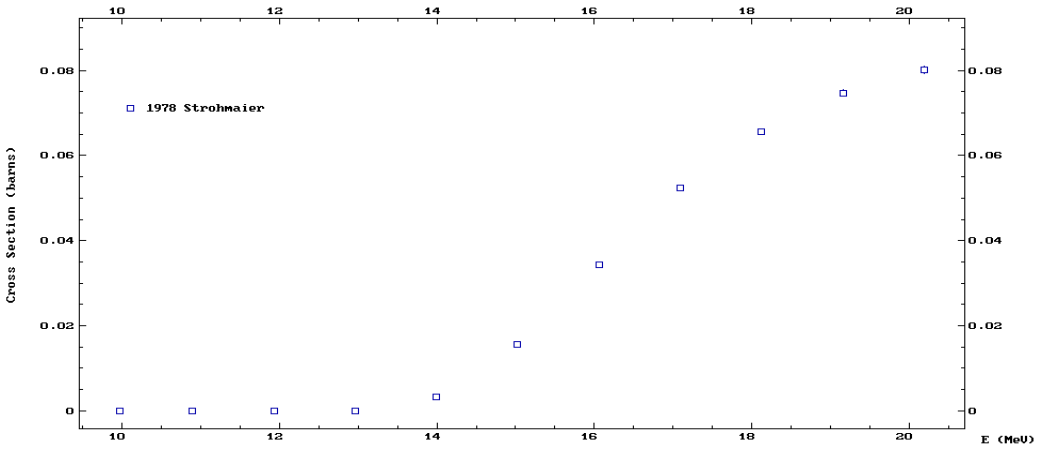


Figura 296. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,α+n)13-AL-27

[6] 15-P-31(n,αBS),, Con las siguientes secciones eficaces.

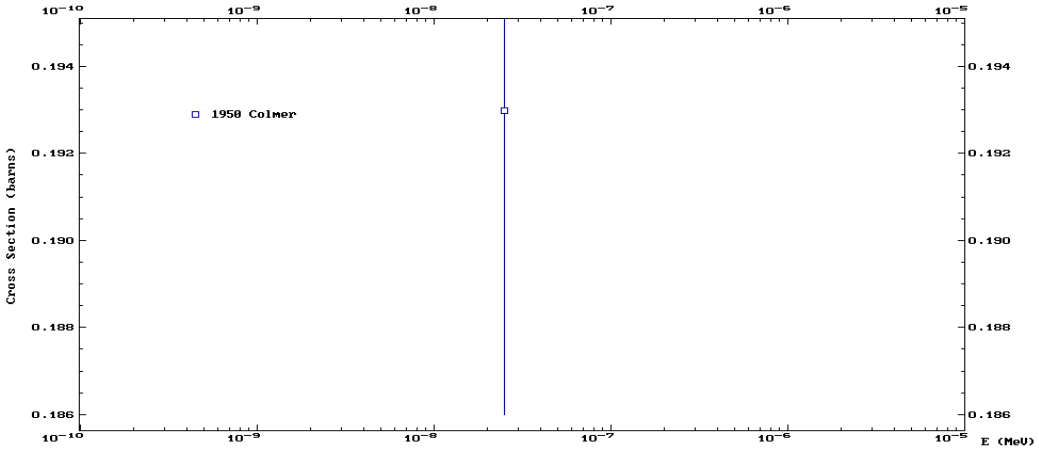


Figura 297. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,αBS)

[7] 15-P-31(n,EL)15-P-31. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

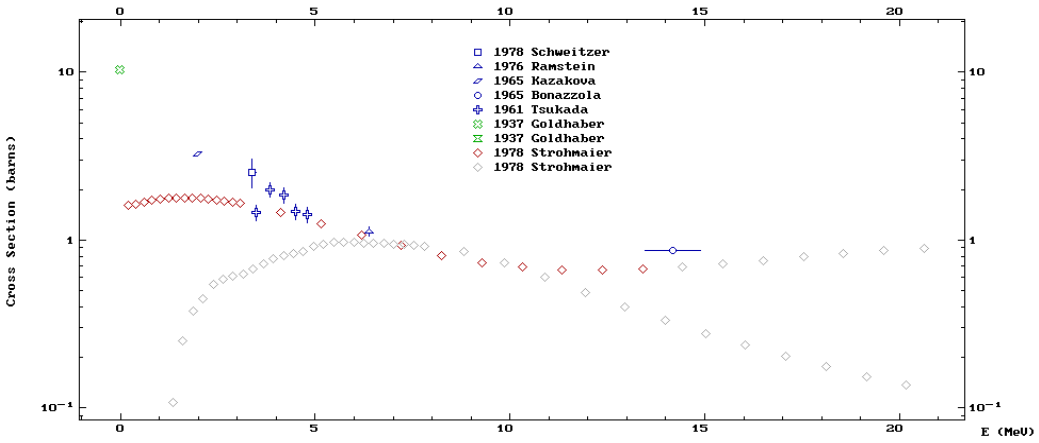


Figura 298. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,EL)15-P-31

[8] 15-P-31(n,g)15-P-32. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

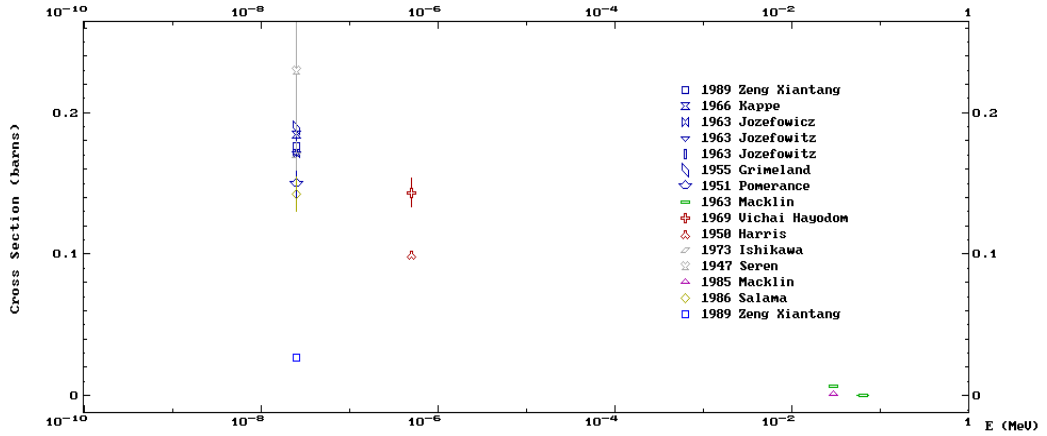


Figura 299. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,g)15-P-32.

[9] 15-P-31(N,HE3)13-AL-29. La sección eficaz es

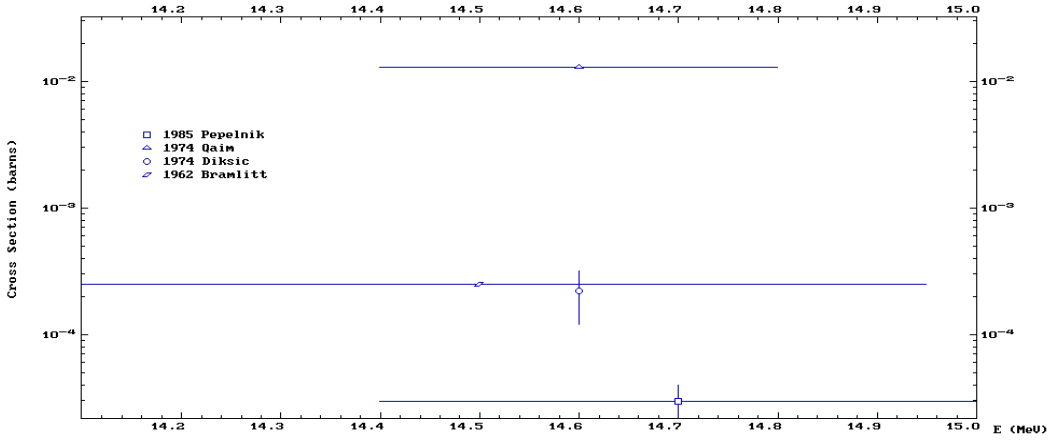


Figura 300. Sección eficaz de la reacción

[10] 15-P-31(n,n+α)13-AL-27. La sección eficaz correspondiente es

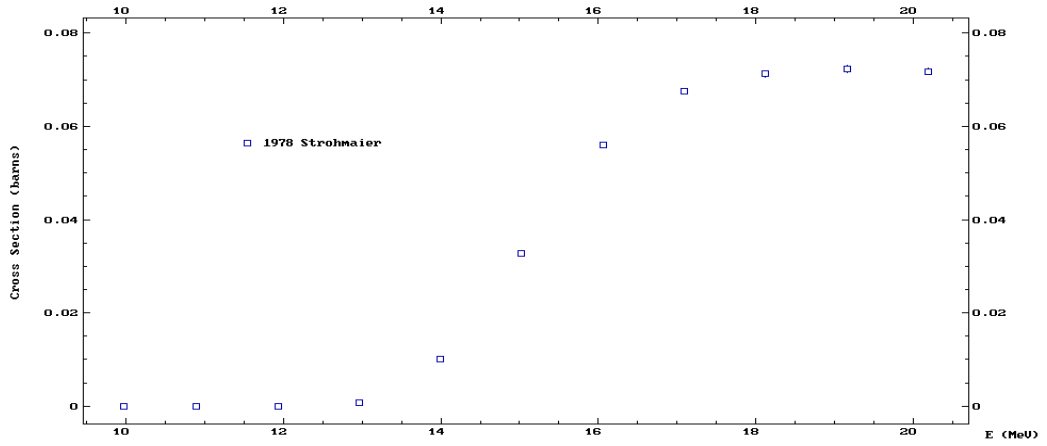


Figura 301. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,g)15-P-32

[11] 15-P-31(n,INL)15-P-31. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

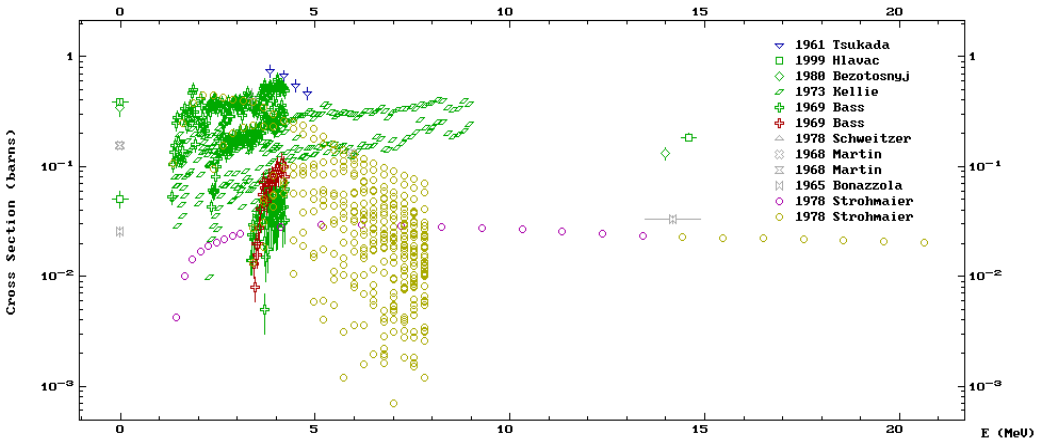


Figura 302. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,INL)15-P-31

[12] 15-P-31(n,n+2P)13-AL-29. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

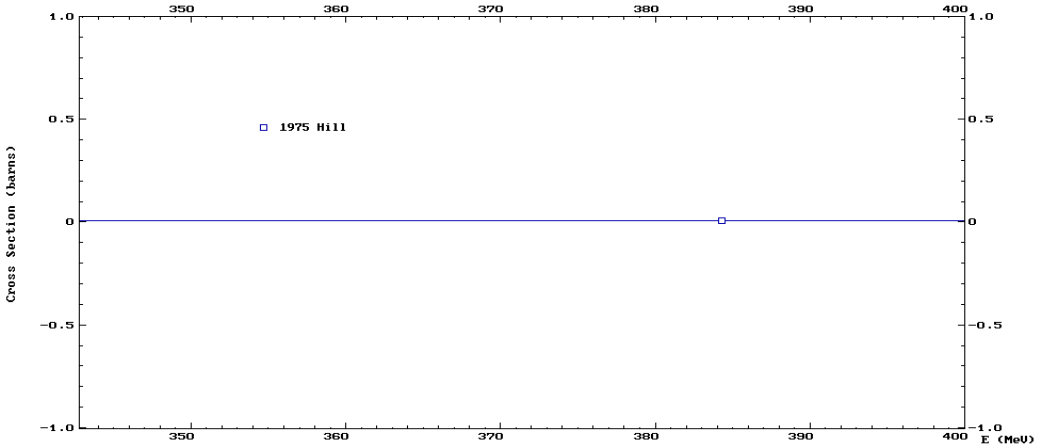


Figura 303. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+2P)13-AL-29

[13] 15-P-31(n,n+3P)12-MG-28. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

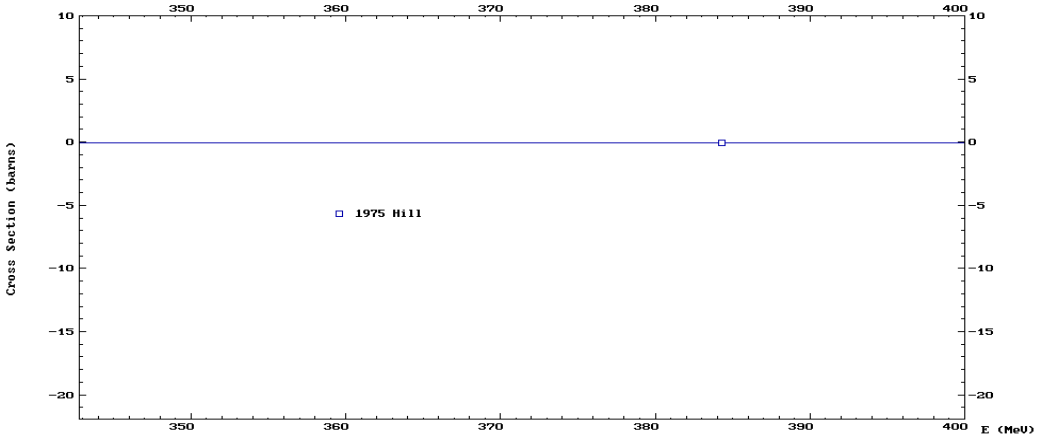


Figura 304. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+3P)12-MG-28.

[14] 15-P-31(n,n+p)14-SI-30. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

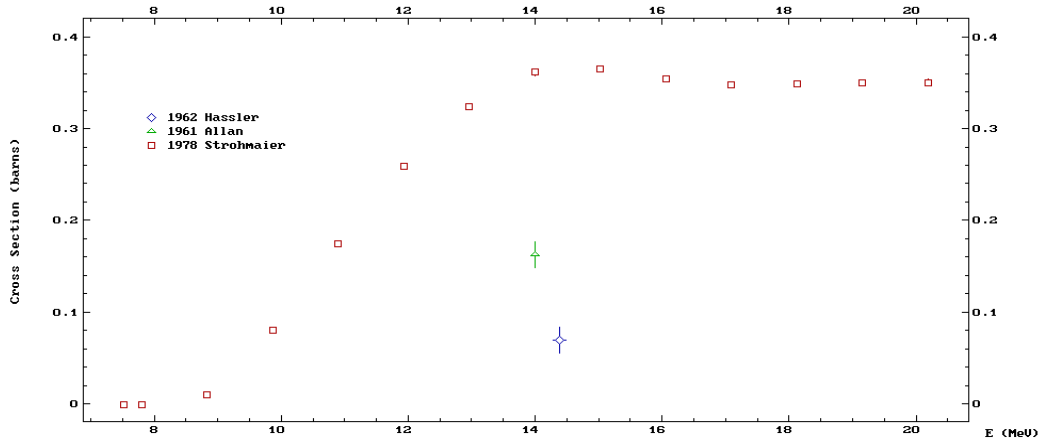


Figura 305. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+p)14-SI-30.

[15] 15-P-31(n,n+X), Sus secciones eficaces son:

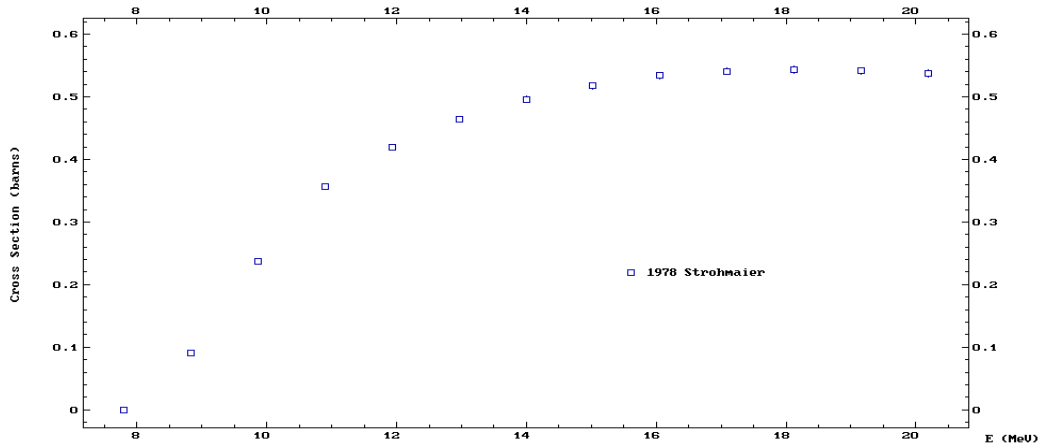


Figura 306. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,n+X)

[16] 15-P-31(n,non),, Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

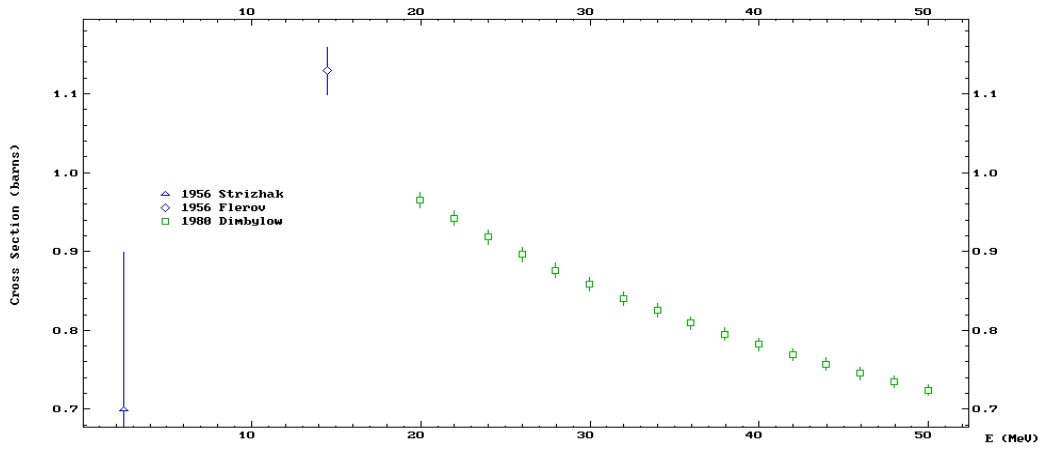


Figura 307. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,non)

[17] 15-P-31(n,p)14-SI-31. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

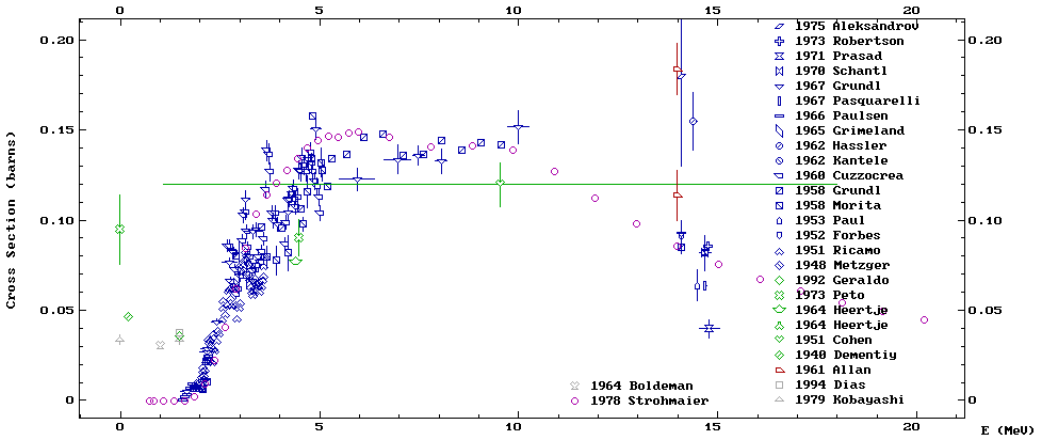


Figura 308. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,p)14-SI-31

[18] 15-P-31(n,p+X), Con las siguientes secciones eficaces.

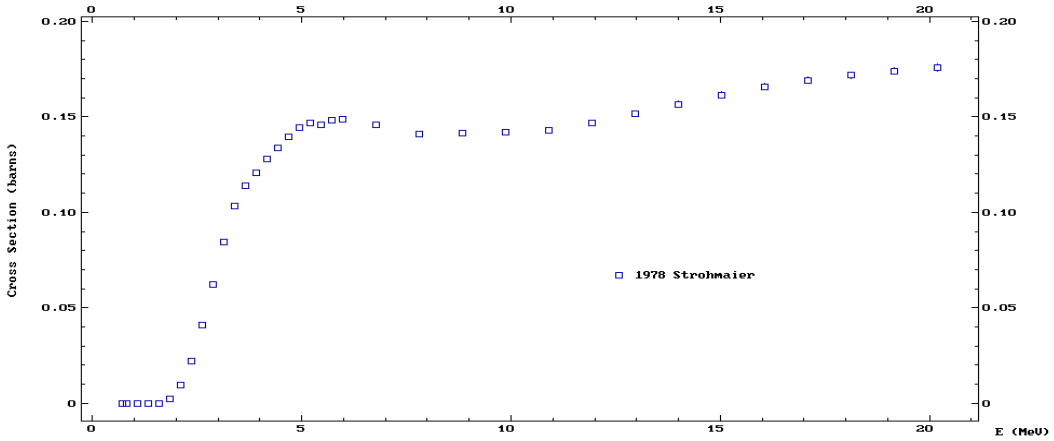


Figura 309. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,p+X),

[19] 15-P-31(n,SCT)15-P-31 Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

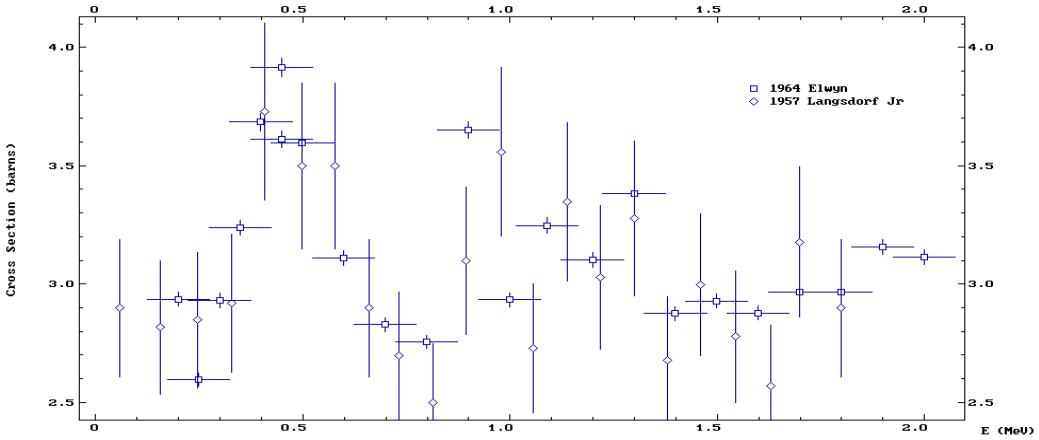


Figura 310. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,SCT)15-P-31

[20] 15-P-31(n,THS)15-P-31 Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

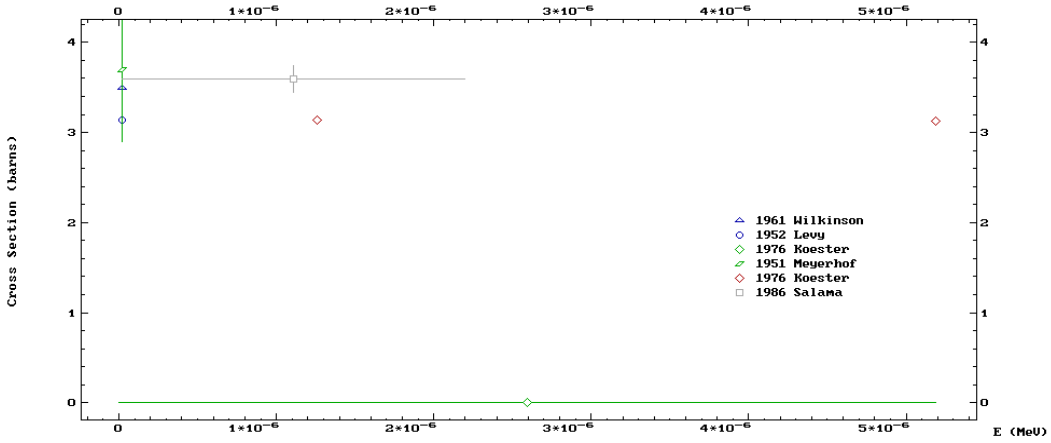


Figura 311. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,THS)15-P-31

[21] 15-P-31(n,TOT),, La sección eficaz es

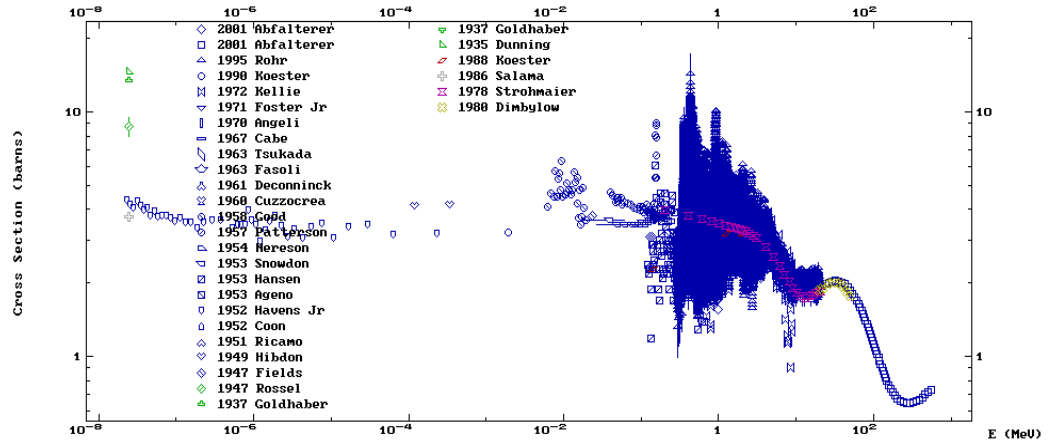


Figura 312. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(n,TOT)

[22] 15-P-31(N,X)0-G-0 La sección eficaz correspondiente es

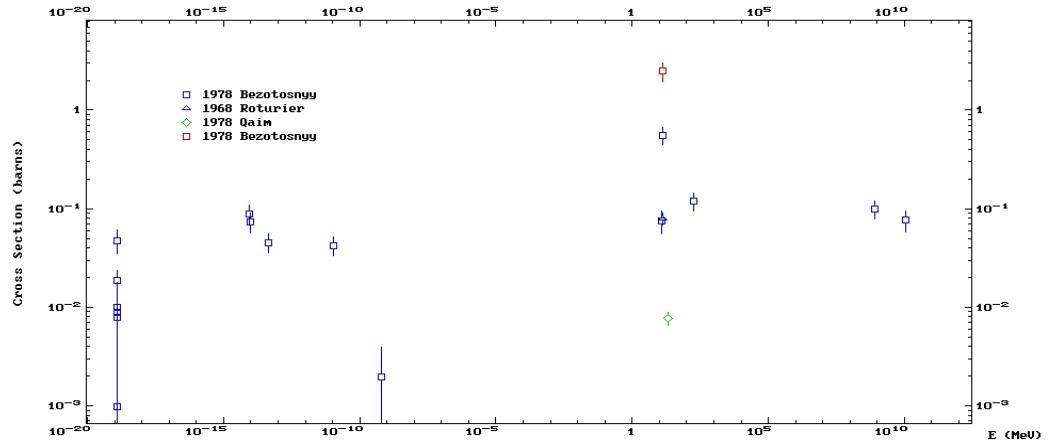


Figura 313. Sección eficaz de la reacción 15-P-31(N,X)0-G-0

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 31P con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
15-P-31(N,2A)11-NA-24	4 Mev	3 Barns	De interes
15-P-31(n,α)13-AL-28	En el rango de la fuente	Menor que =0,15 Barns	De interes
15-P-31(n,p)14-SI-31	En el rango de la fuente	Menor que =0,15 Barns	De interes

Tabla 108. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 31P con los neutrones.

5.8.1.1. Reacción 15-P-31(N,2A)11-NA-24

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de dos modos de decaimiento:

[1] Modo 1

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{24}_{11}$Na	472,207	1+	20,20 ms	β^-: 0,05	5513,6	$^{24}_{12}$Mg

Tabla 109. Modo 1 de decaimiento del 11Na24

- Emisión Beta-del modo 1 de decaimiento:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
2768,3	5985,8	0,05	0,00138415

Tabla 110. Emisión β del 11Na24

[2] Modo 2:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{24}_{11}$Na	0	4+	14,9590 h	β^-	5513,6	$^{24}_{12}$Mg

Tabla 111. Modo 2 de decaimiento del 11Na24.

- Emisión Beta- del modo 2 de decaimiento:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
89,24	278,4	0,053	4,7E-5
502,2	1275,2	2,5E-4	1,3E-6
554,1	1390,7	99,9	0,5538
1865,5	4144,9	0,003	5,5965E-5

Tabla 112. Emisión β del modo 2 del 11Na24.

- Emisión gamma y X:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
996,82	0,00140	1,40E-5
1368,633	100	1,369
2754,028	99,944 %	2,75249
2869,50	3,0E-4	9E-6
3866,19	0,052	0,00201
4237,96	0,00110	4,7E-5

Tabla 113. Emisión γ y X del 11Na24.

5.8.1.2. Reacción 15-P-31(n,α)13-AL-28

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{28}_{13}Al$	0,0	3+	2,2414 m	β^-	4641,8	$^{28}_{14}Si$

Tabla 114. Características de decaimiento del 13Al28.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1247.2	2862.9	99.990	1.2471

Tabla 115. Emsión β del 13Al28.

- Emisión X y γ.:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1778,85	100	1,77885

Tabla 116. Emisión X y γ del 13 Al 28.

5.8.1.3. Reacción 15-P-31(n,p)14-SI-31.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{31}_{14}Si$	0	3/2+	157,3 m	β^-: 100	1490,5	$^{31}_{15}P$

Tabla 117. Decaimiento del 14-Si-31.

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
68,7	224,3	0,07	4,809E-5
595,6	1490,5	99,93	0,5952

Tabla 118. Emisión β del 14Si31.

- Emisión Gamma y X.

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
1266,15 *10*	0,07%	8,8631E-4

Tabla 119. Emisión X y γ del 14Si31

5.8.2. Conclusiones de la reacción del Fósforo con los neutrones.

Las únicas reacciones interesantes del 15P31 dan productos en cuyo decaimiento aparecen radiaciones γ con niveles de energía menores de la energía que producen los productos de la interacción de los neutrones con el flúor.

5.9. Estudio del Mg.

Sus isótopos son:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{24}Mg	78,7	23,985	0	--	estable
^{25}Mg	10,13	24,9858	5/2	--	estable
^{26}Mg	11,17	25,9826	0	--	estable
^{27}Mg	0	27	1/2	9,45m	β^-
^{28}Mg	0	28	0	21,0h	β^-

Tabla 120. Isótopos del Mg.

5.9.1. Reacciones del 24Mg con los neutrones.

[1] 12-Mg-24(n,2n)12-MG-23. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

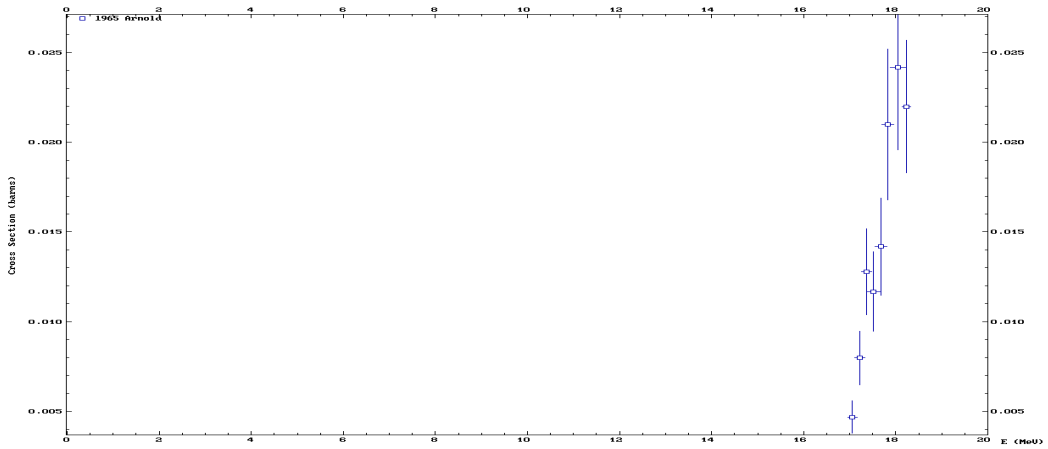


Figura 314. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,2n)12-MG-23

[2] 12-Mg-24(n,α)10-Ne-21. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

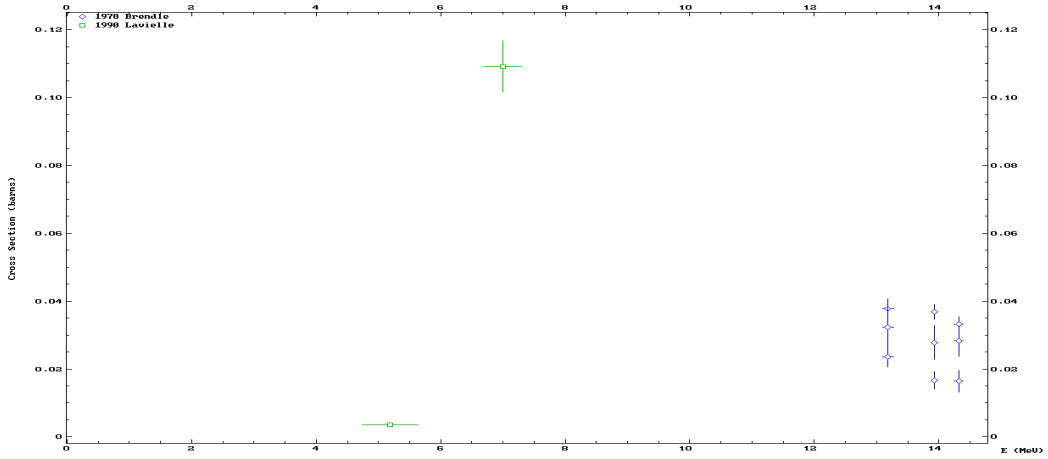


Figura 315. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,α)10-Ne-21

[3] 12-Mg-24(n,EL)12-MG-24. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

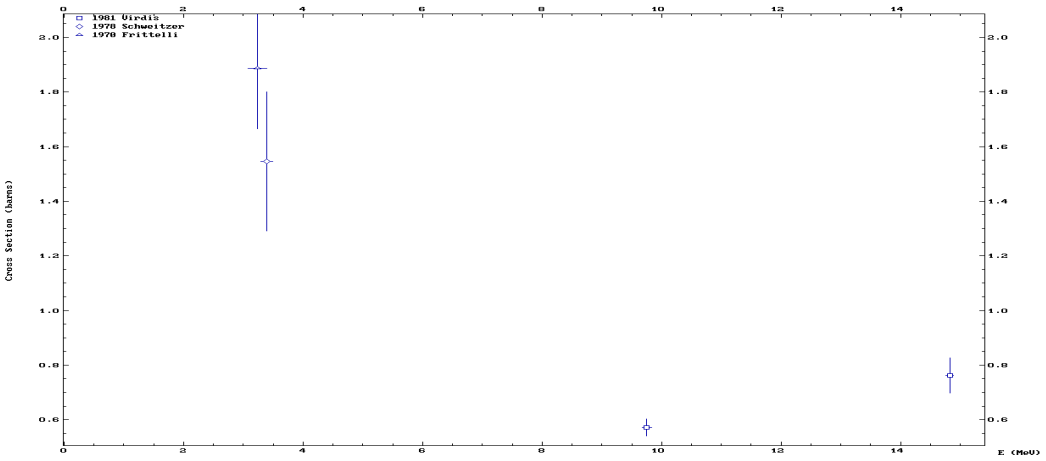


Figura 316. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,EL)12-MG-24

[4] 12-Mg-24(n,g)12-MG-25. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

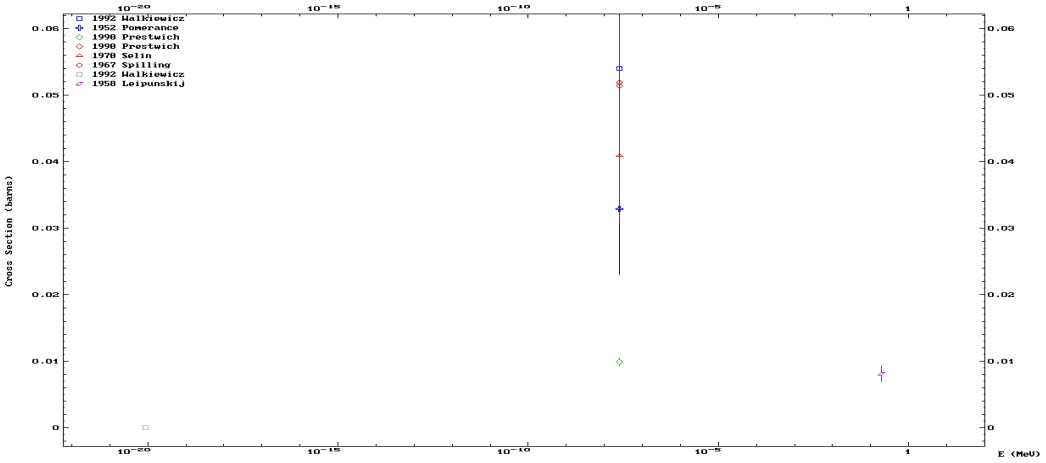


Figura 317. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,g)12-MG-25

[5] 12-Mg-24(n,INL)12-MG-24. Sus secciones eficaces son:

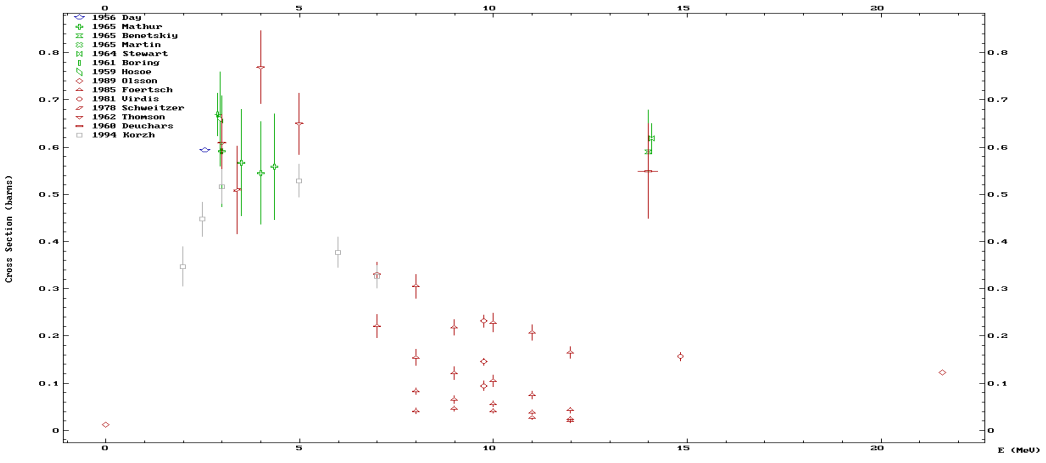


Figura 318. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,INL)12-MG-24

[6] 12-Mg-24(n,n+α)10-Ne-20. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

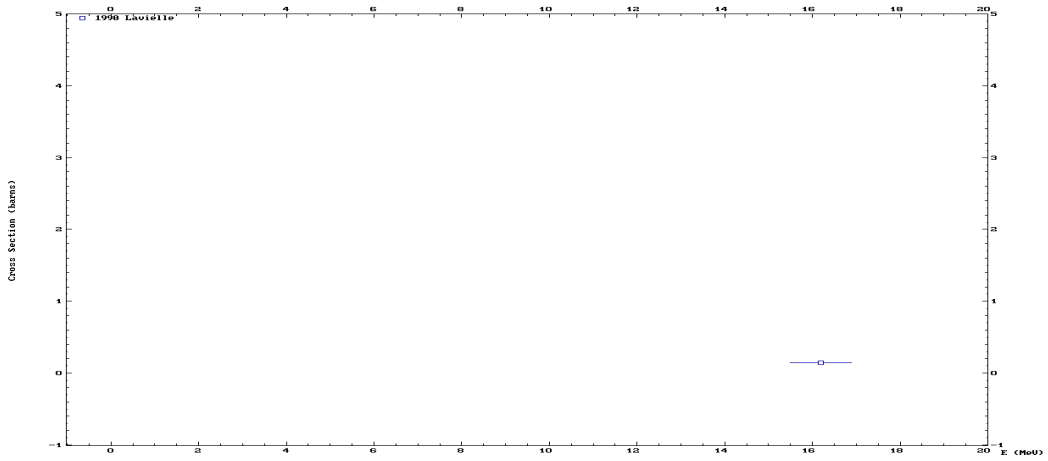


Figura 319. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,n+α)10-Ne-20

[7] 12-Mg-24(n,p)11-Na-24. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

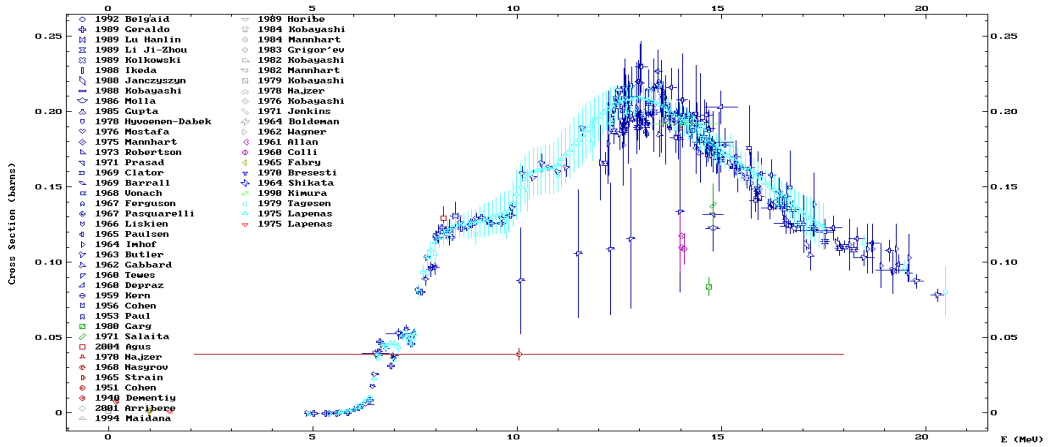


Figura 320. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,p)11-Na-24

[8] 12-Mg-24(n,TOT). Con las siguientes secciones eficaces.

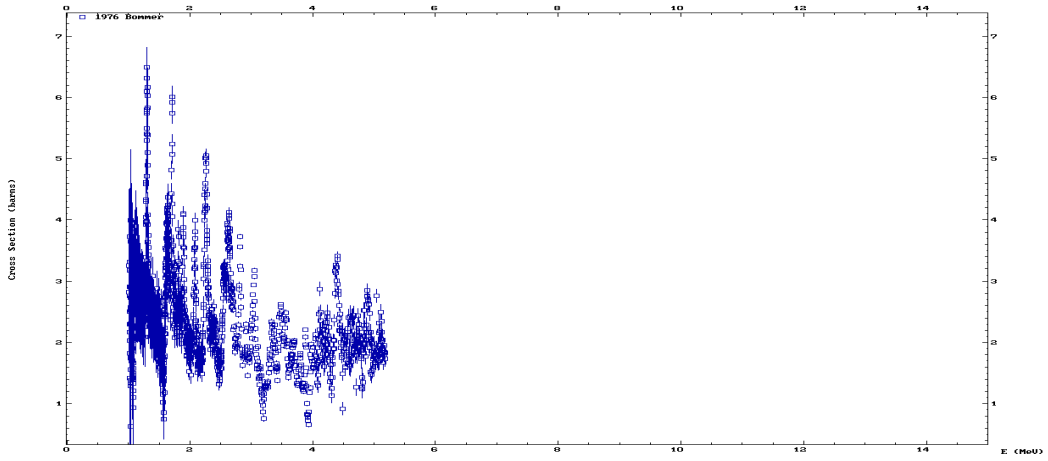


Figura 321. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,TOT)

[9] 12-Mg-24(N,X)0-G-0. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

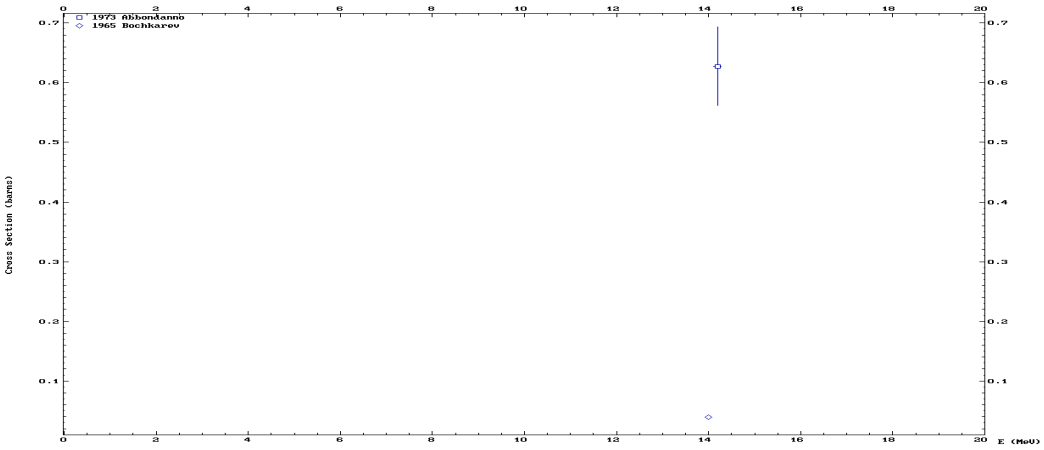


Figura 322. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(N,X)0-G-0

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 24Mg con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
12-Mg-24(n,α)10-Ne-21	7,5 Mev	0,11 Barn	De interés
12-Mg-24(n,p)11-Na-24	Entre 5 y 20 MeV	Menor que =,15 Barns	De interés

Tabla 121. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 24Mg con los neutrones.

5.9.1.1. Reacción 12-Mg-24(n,α)10-Ne-21.

El elemento producido en esta reacción es estable y no interfiere en la lectura.

5.9.1.2. Reacción 12-Mg-24(n,p)11-Na-24.

Se han encontrado dos formas de decaimiento:

[1] Modo 1.

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jn padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{24}_{11}$Na	472.207 *9*	1+	20.20 ms *7*	β^-: 0.05 %	5513.6 *6*	$^{24}_{12}$Mg

Tabla 122. Modo 1 de decaimiento del 11 Na 24

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
2768.3	5985.8	0.05 %	0.00138415

Tabla 123. Emisión β del modo 1 de decaimiento del 11 Na 24

[2] Modo 2:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jn padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{24}_{11}$Na	0	4+	14.9590 h	β^-	5513.6	$^{24}_{12}$Mg

Tabla 124. Modo 2 de decaimiento del 11 Na 24

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
89.24	278,4	0.05	4.7E-5
502.2	1275	2.5E-4	1.3E-6
554.1	1390,7	99.944	0.5538
1865.5	4144,9	0.003	5.5965E-5

Tabla 125. Emisión β del segundo modo de decaimiento del 11 Na 24

- Emisión X y Gamma

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
996,82	0.00140	1.40E-5
1368,633	100	1.369
2754,028	99.944	2.75249
2869,50	3.0E-4	9E-6
3866,19	0.052	0.00201
4237,96	0.00110	4.7E-5

Tabla 126. Emisión X y γ del segundo modo de decaimiento del 11 Na 24.

5.9.2. Reacciones del 25Mg con los neutrones.

[1] 12-Mg-25(n,α)10-Ne-22. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

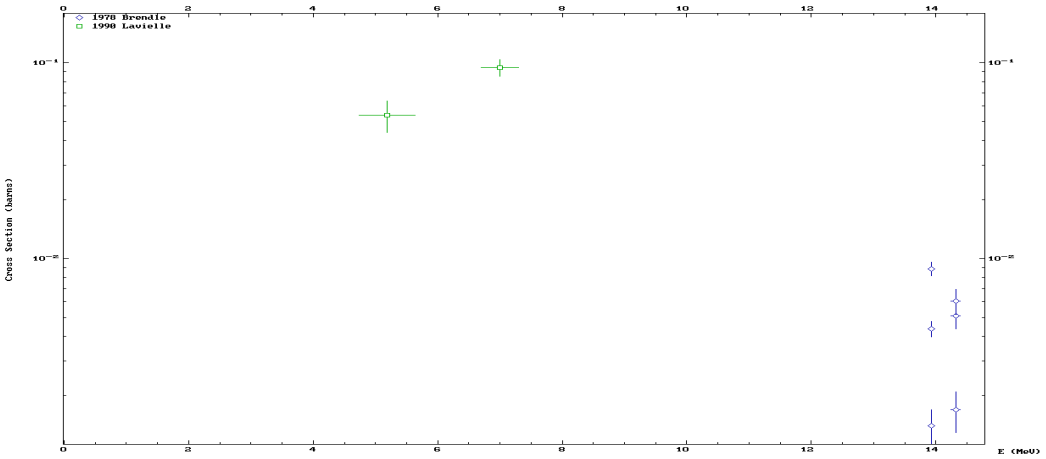


Figura 323. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,α)10-Ne-22

[2] 12-Mg-24(n,p)11-Na-24. La sección eficaz es

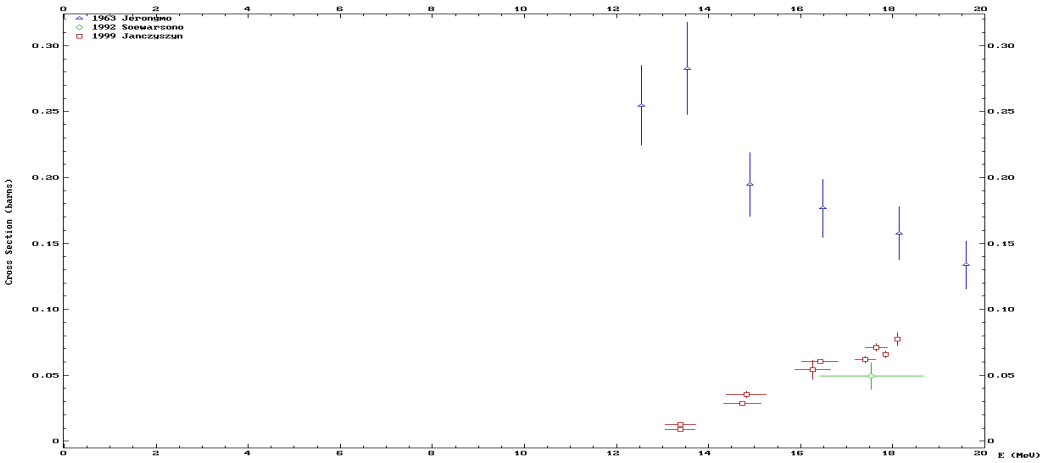


Figura 324. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-24(n,p)11-Na-24

[3] 12-Mg-25(n,g)12-Mg-26. La sección eficaz correspondiente es:

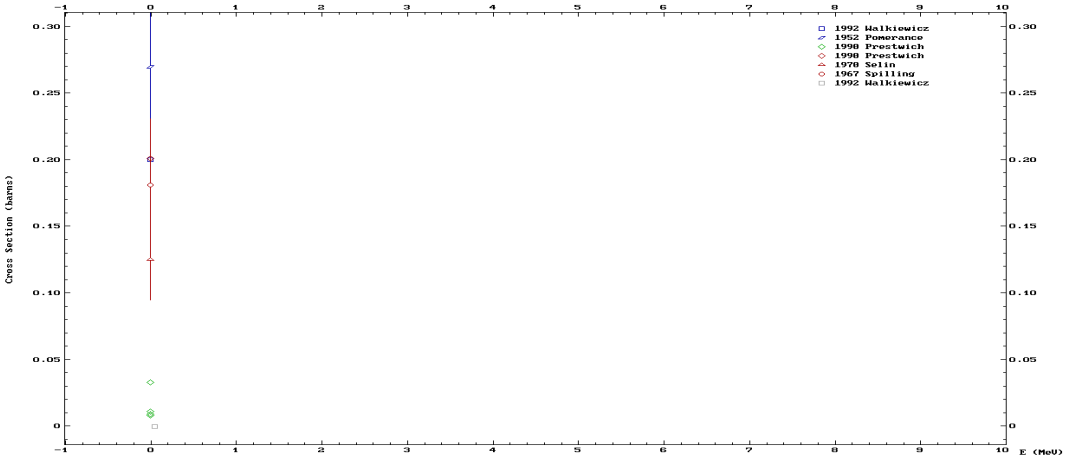


Figura 325. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,g)12-Mg-26

[4] 12-Mg-25(n,INL)12-Mg-25. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

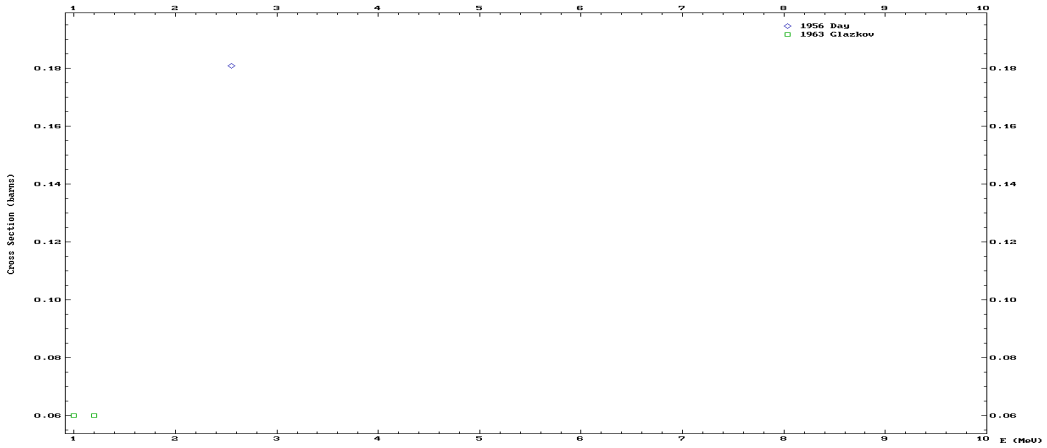


Figura 326. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,INL)12-Mg-25

[5] 12-Mg-25(n,n+p)10-Na-24. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

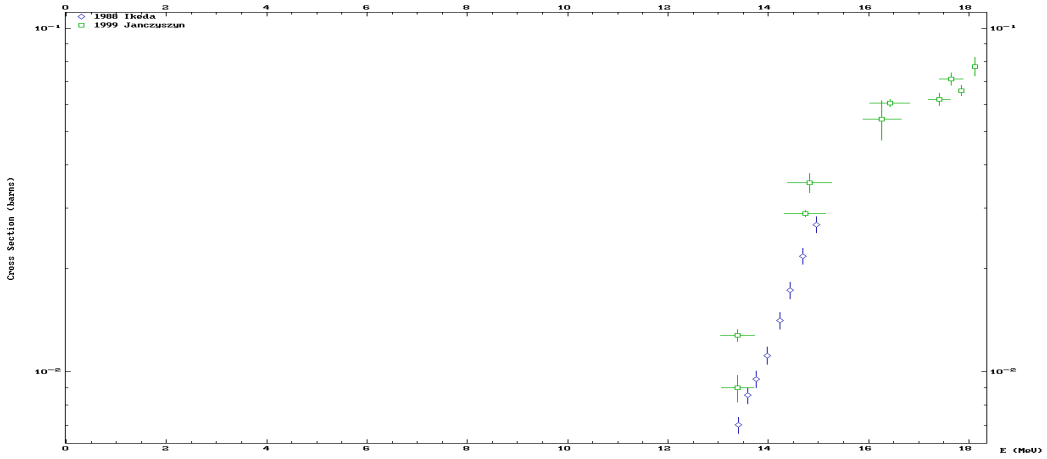


Figura 327. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,n+p)10-Na-24

[6] 12-Mg-25(n,p)11-Na-25. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

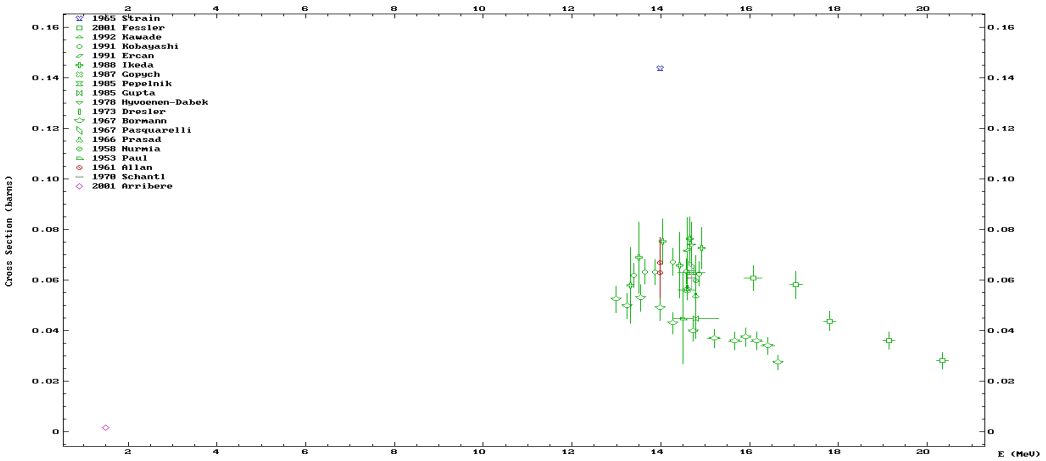


Figura 328. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,p)11-Na-25

[7] 12-Mg-25(n,TOT). Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

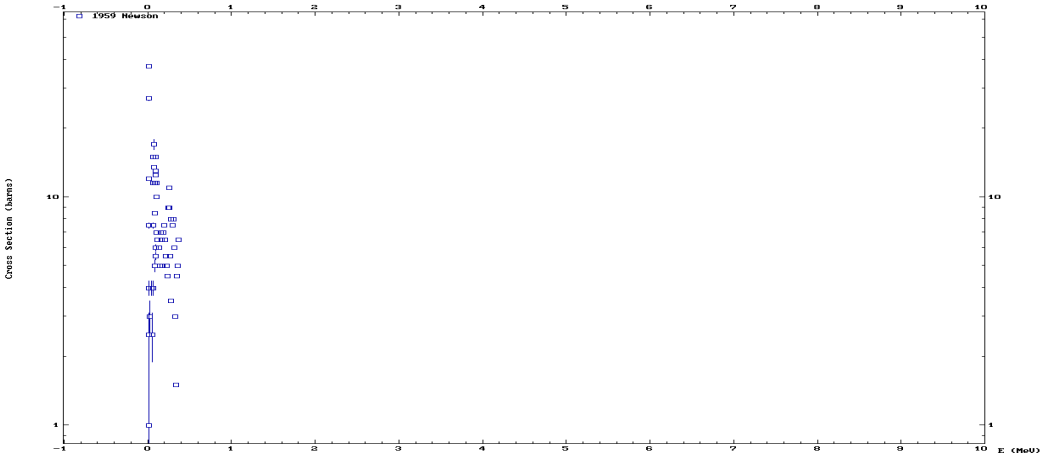


Figura 329. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,TOT)

[8] 12-Mg-25(n,n+p)11-Na-24. Sus secciones eficaces son:

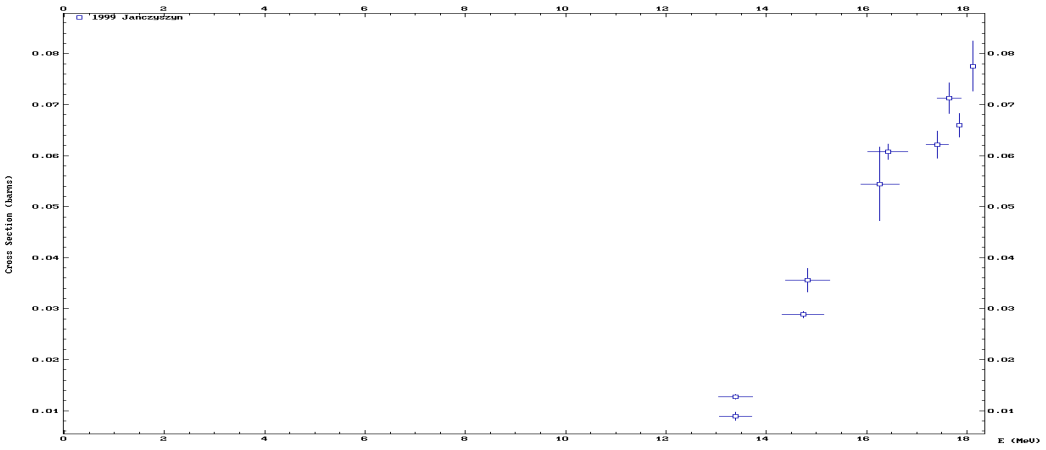


Figura 330. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-25(n,n+p)11-Na-24

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 25Mg con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
12-Mg-25(n,α)10-Ne-22	5 y 7 MeV	Menor que 0,1	De interés

Tabla 127. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 25Mg con los neutrones.

5.9.2.1. Reacción 12-Mg-25(n,α)10-Ne-22.

El elemento producido en esta reacción es estable y no interfiere en la lectura.

5.9.3. Reacciones del 26Mg con los neutrones.

[1] 12-Mg-26(n,α)10-Ne-23. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

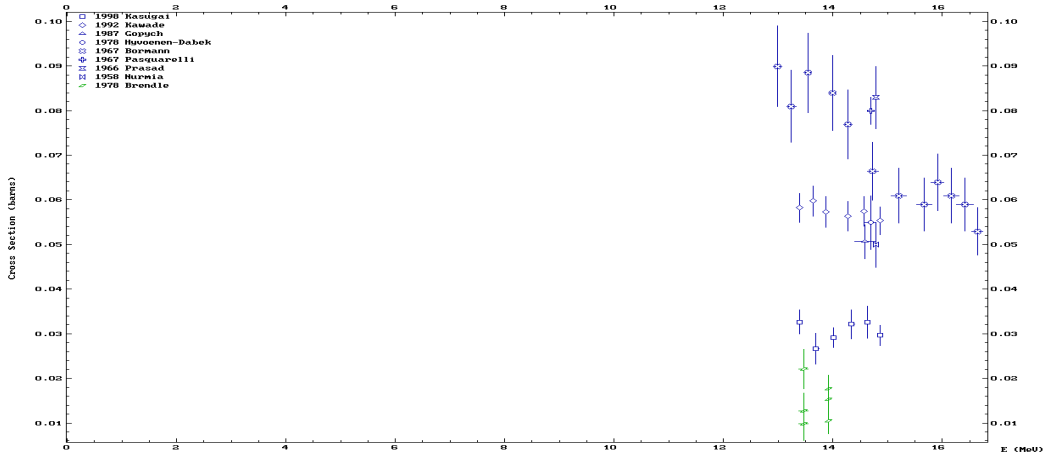


Figura 331. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,α)10-Ne-23

[2] 12-Mg-26(n,n+p)11-Na-25. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

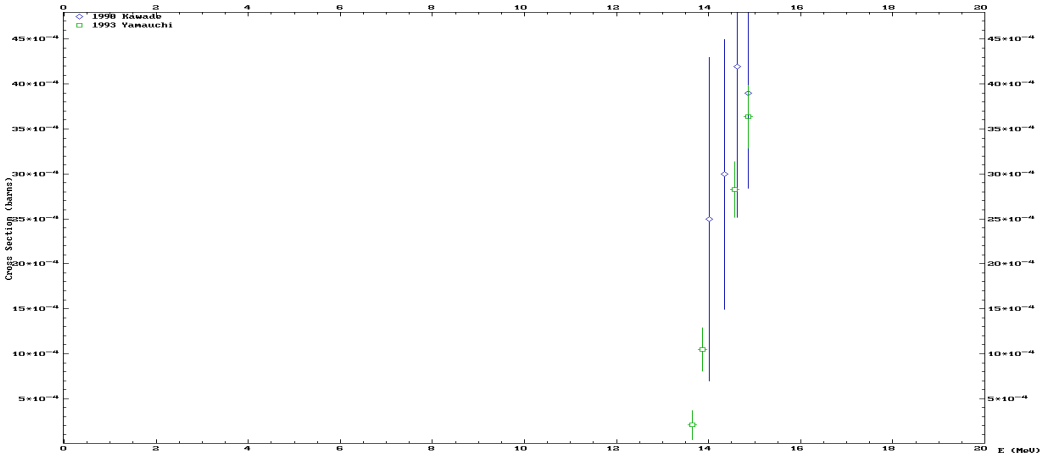


Figura 332. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,n+p)11-Na-25

[3] 12-Mg-26(n,g)12-Mg-27. Con las siguientes secciones eficaces.

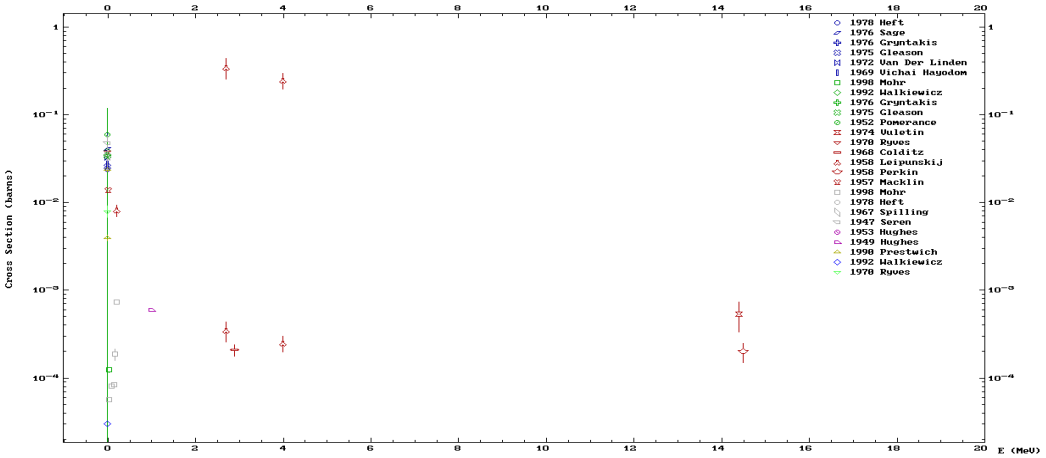


Figura 333. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,g)12-Mg-27

[4] 12-Mg-26(N,He3)10-Ne-24. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

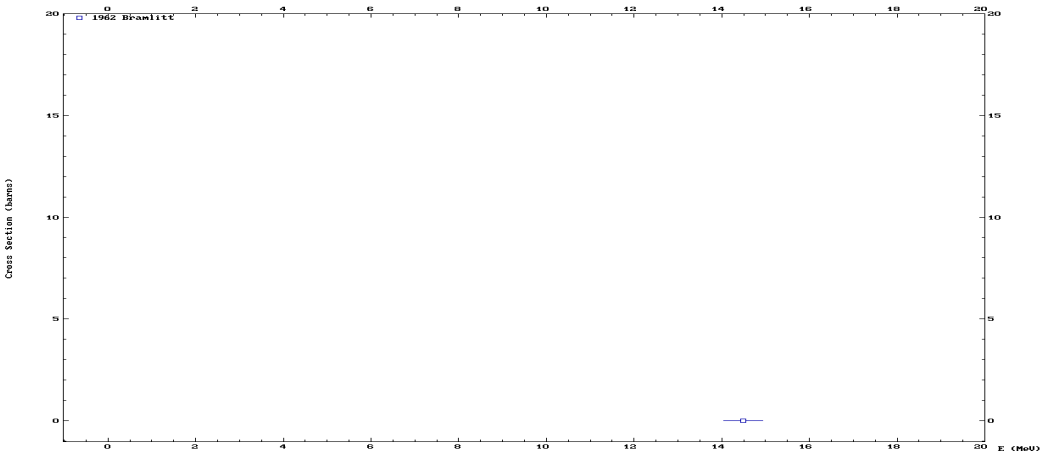


Figura 334. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(N,He3)10-Ne-24

[5] 12-Mg-26(n,INL)12-Mg-26. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

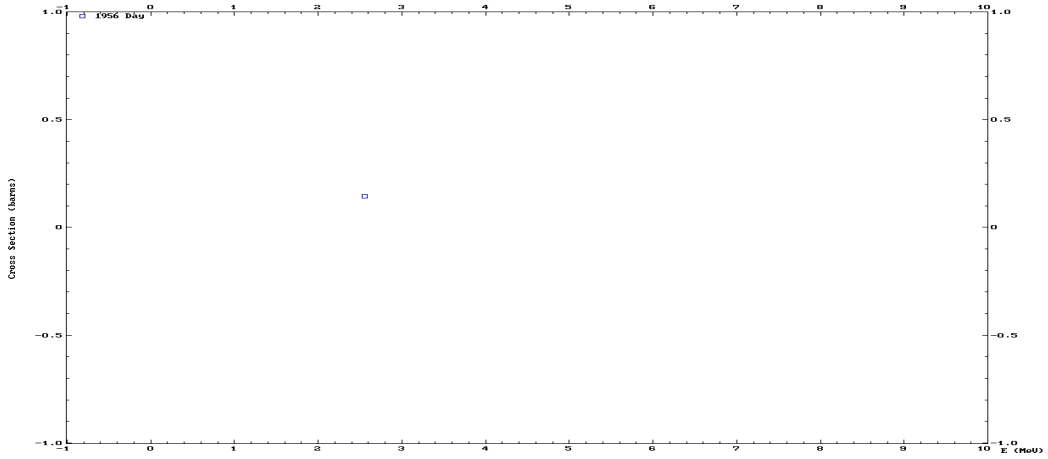


Figura 335. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,INL)12-Mg-26

[6] 12-Mg-26(n,T)11-Na-24. La sección eficaz es

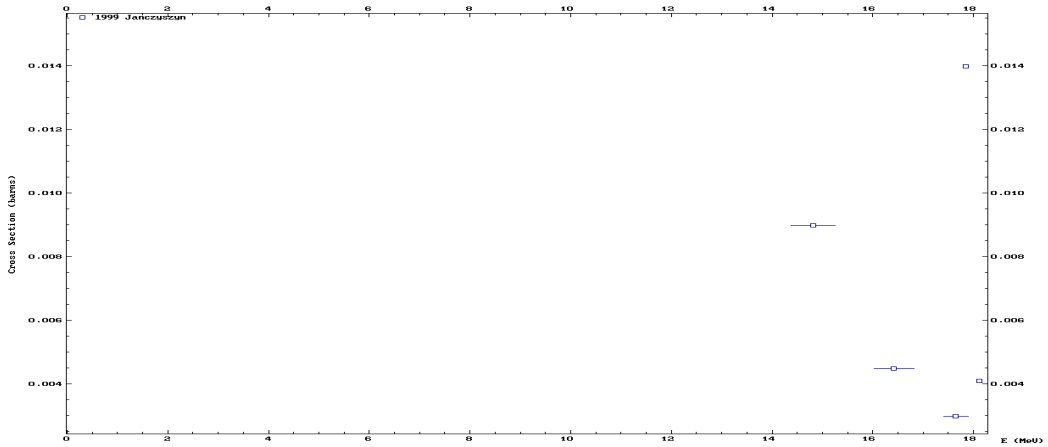


Figura 336. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,T)11-Na-24

[7] 12-Mg-26(n,p)11-Na-26. La sección eficaz correspondiente es

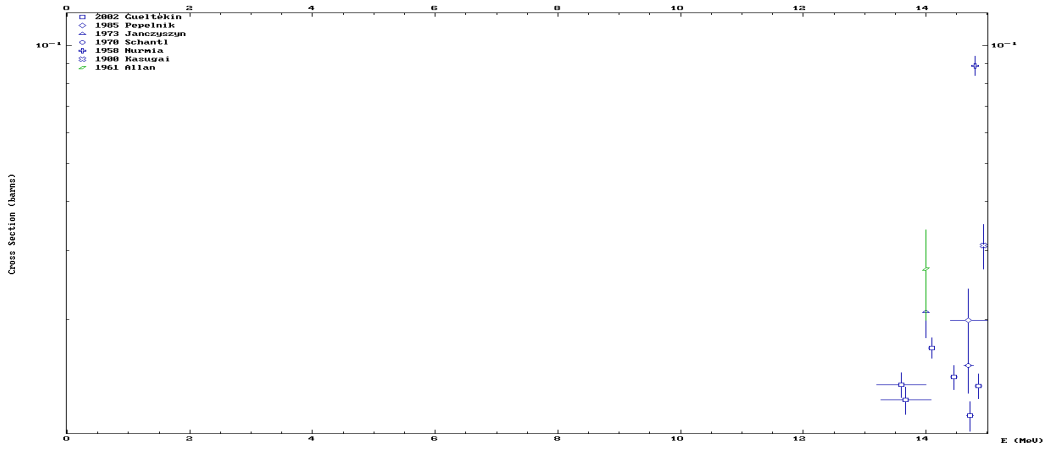


Figura 337. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,p)11-Na-26

[8] 12-Mg-26(n,TOT). Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

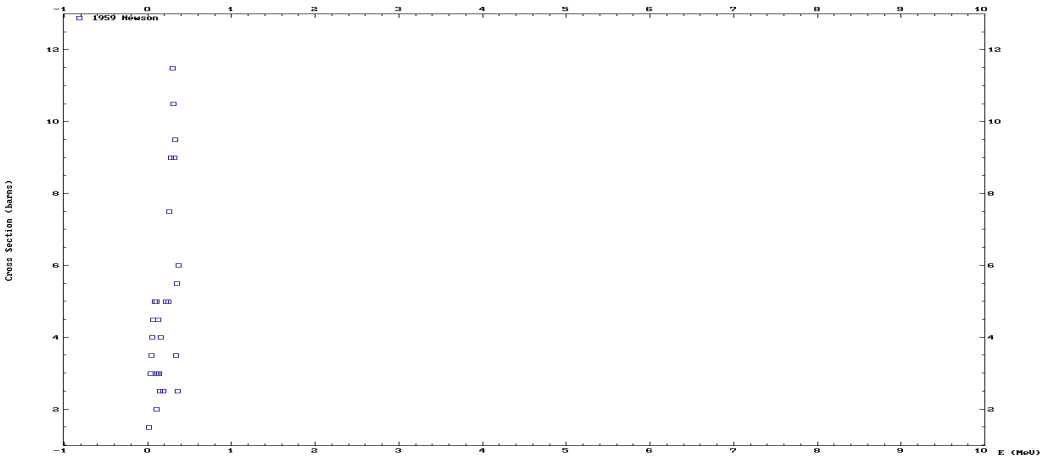


Figura 338. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,TOT)

[9] 12-Mg-26(n,n+p)11-Na-25.

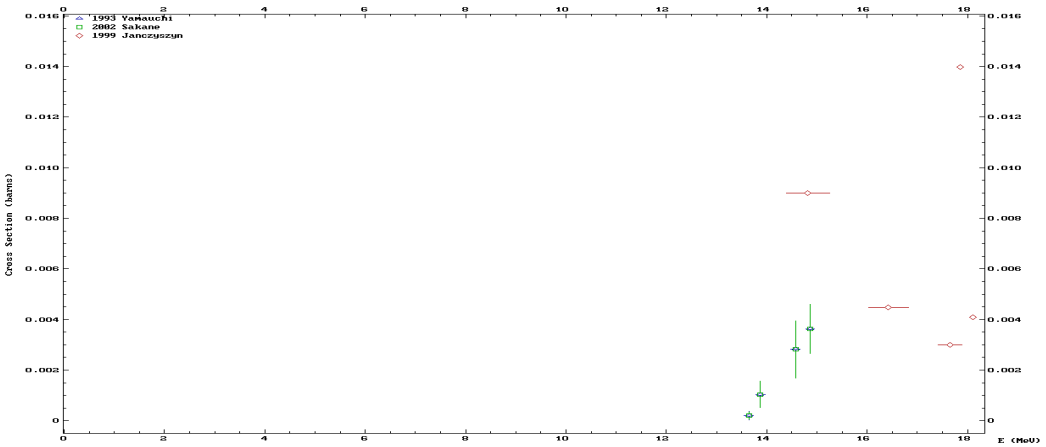


Figura 339. Sección eficaz de la reacción 12-Mg-26(n,n+p)11-Na-25

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 26Mg con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	***Rango de energías de activación***	***Rango de σ***	***Comentarios***
12-Mg-26(n,g)12-Mg-27	Menor que 5 MeV	Menor que 0,3 Barns	De interes

Tabla 128. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 26Mg con los neutrones.

5.9.3.1. Reacción 12-Mg-26(n,g)12-Mg-27

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jn padre	T1/2 padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{27}_{12}$Mg	0.0	1/2+	9.458 m *12*	β^-: 100 %	2610.6 *6*	$^{27}_{13}$Al

Tabla 129. Características de decaimiento del 12 Mg 27.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
645,7	1596,1	29,0	0,187
724,2	1766,8	71,0	0,514

Tabla 130. Emisión β del 12Mg27

- Emisión X y γ:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
170,686	0,80	0,00137
843,76	71,8	0,606
1014,44	28,0	0,284

Tabla 131. Emisión X y γ del 12Mg27.

5.9.4. Conclusiones de las reacciones del Magnesio con los neutrones.

Las únicas reacciones interesantes del Magnesio son las que dan como productos 11Na24 y 12Mg27, en cuyo decaimiento aparecen radiaciones γ con niveles de energía menores de la energía que producen los productos de la interacción de los neutrones con el flúor.

5.10. Estudio del Arsénico.

Realizamos el estudio de la misma manera que se ha hecho anteriormente.

El arsénico se encuentra en la naturaleza en la forma ^{75}As, ya que todos los demás isótopos son artificiales, como se ve en la siguiente tabla:

Núclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{71}As	0	71,	5/2	2,72d	EC,β^+
^{72}As	0	72	2	26,0h	β^+,EC
^{73}As	0	73	3/2	80,3d	EC
^{74}As	0	73,924	2	17,78d	EC,β^+,β^-
^{75}As	100	74,9216	3/2	--	Estable
^{76}As	0	75,922	2	26,3h	β^-
^{77}As	0	76,921	3/2	38,8h	β^-

Tabla 132. Isótopos del arsénico.

Por lo tanto, el elemento que se podrá encontrar en la muestra y que reaccionaría con los neutrones es el As 75.

5.10.1. Reacciones del 75As con los neutrones.

Las posibles reacciones del As 75 con los neutrones son las siguientes:

[1] 33-AS-75(n,g)33-AS-76 En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

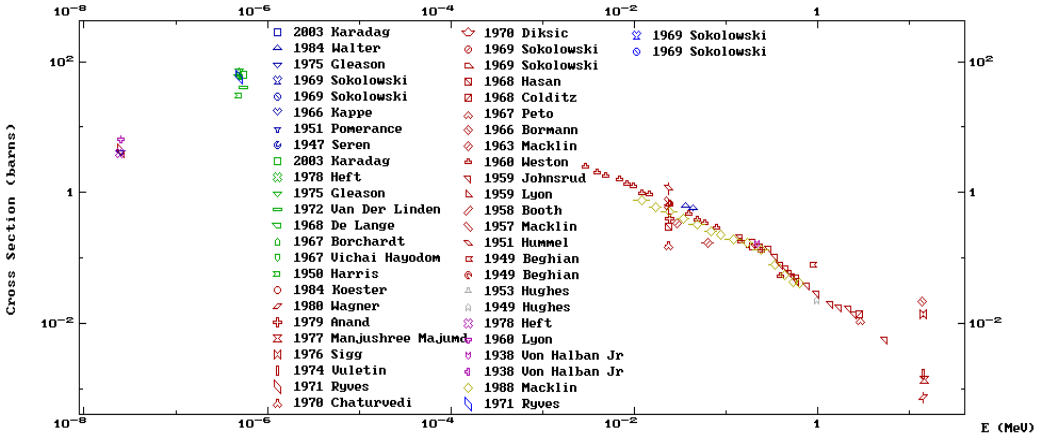


Figura 340. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76

[2] 33-AS-75(n,α)31-GA-72 Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

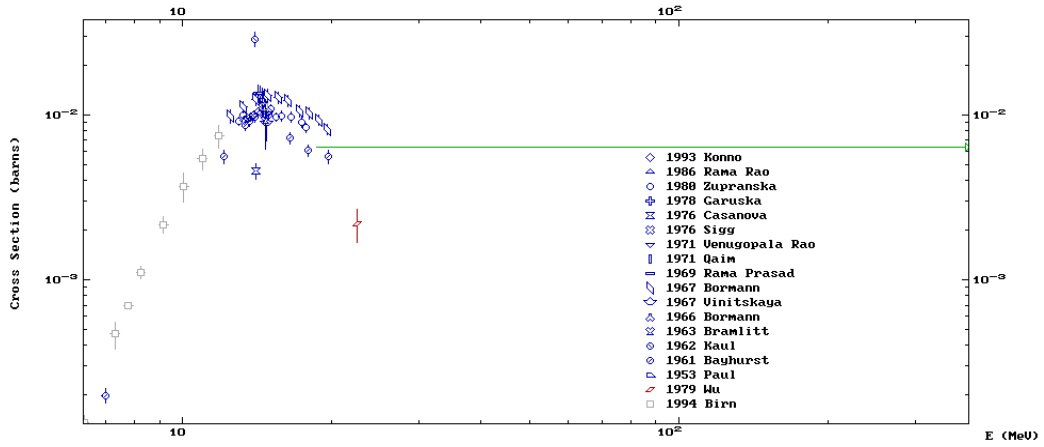


Figura 341. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72

[3] 33-AS-75(N,2P)31-GA-74 Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

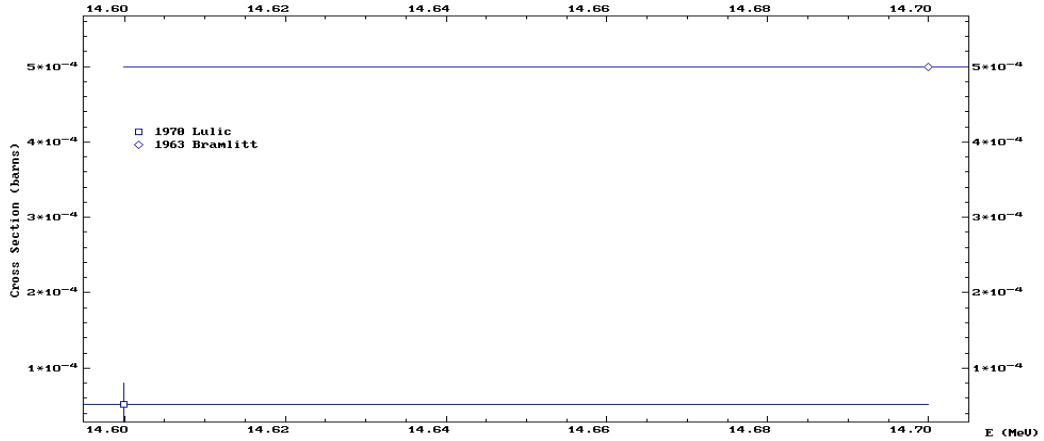


Figura 342. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(N,2P)31-GA-74

[4] 33-AS-75(n,EL),, Sus secciones eficaces son:

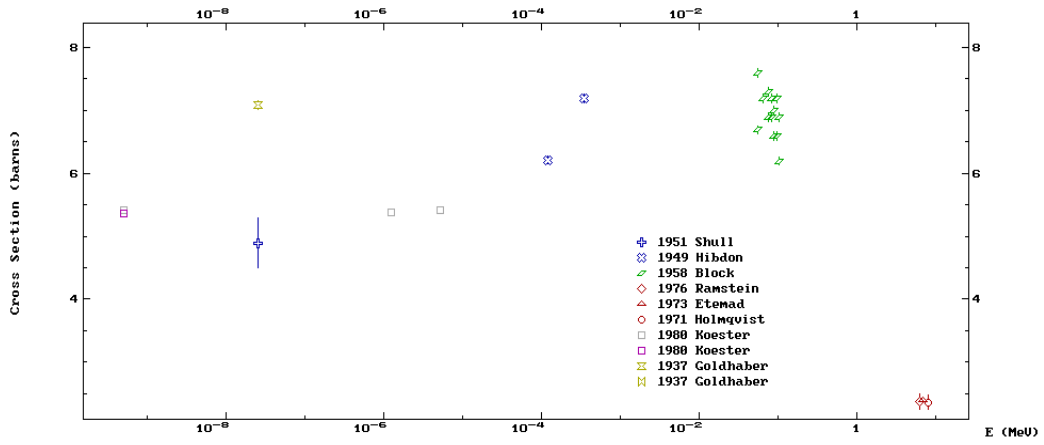


Figura 343. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,EL)

[5] 33-AS-75(n,n+2P)31-GA-73 Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

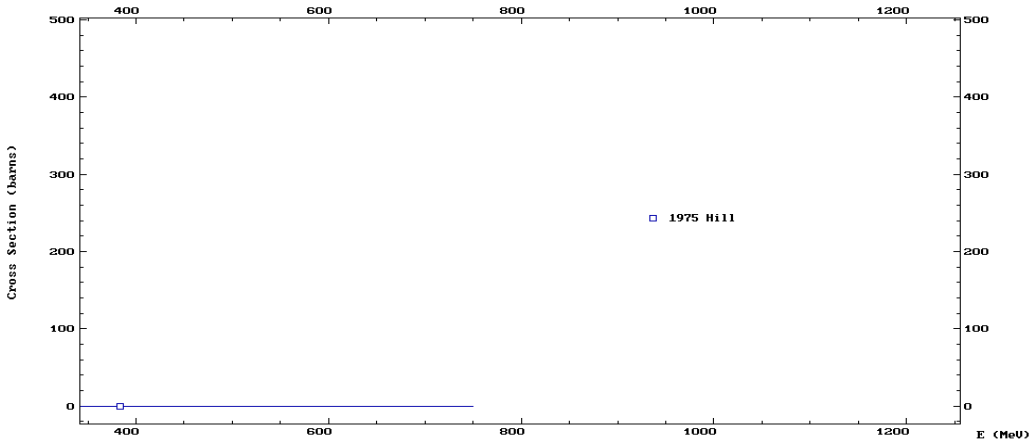


Figura 344. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,n+2P)31-GA-73

[6] 33-AS-75(n,ABS),, En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

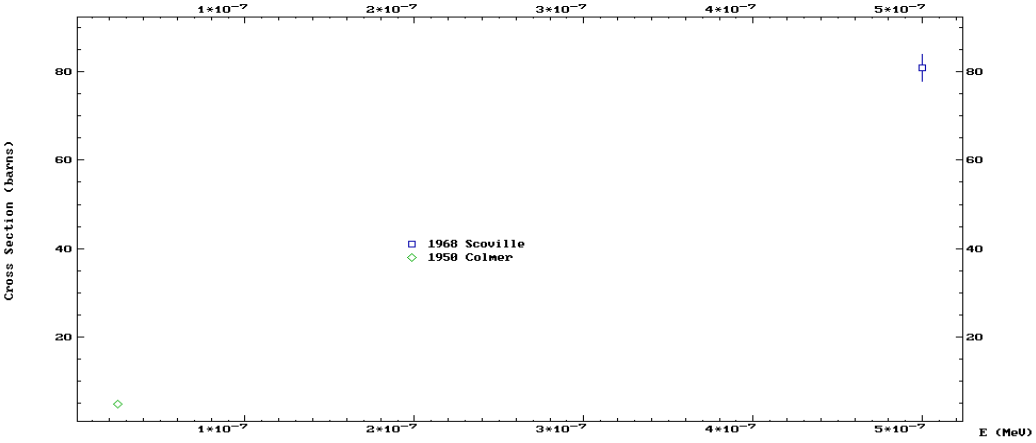


Figura 345. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,abs)

[7] 33-AS-75(n,p)32-GE-75 Con las siguientes secciones eficaces.

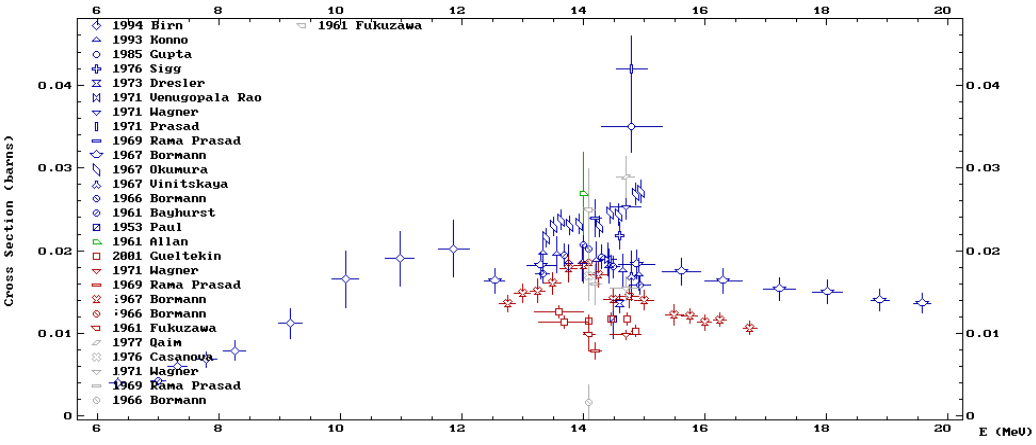


Figura 346. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,p)32-GE-75

[8] 33-AS-75(n,TOT),, Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

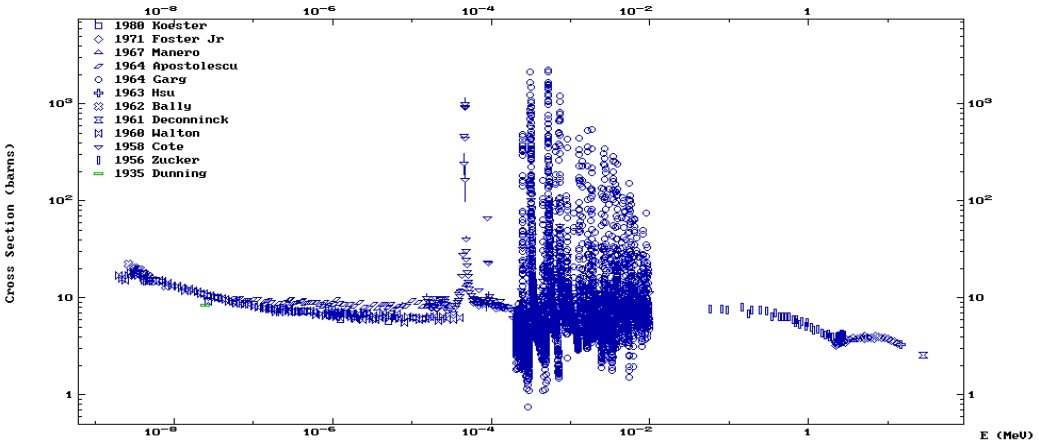


Figura 347. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,TOT)

[9] 33-AS-75(n,n+3P)30-ZN-72. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

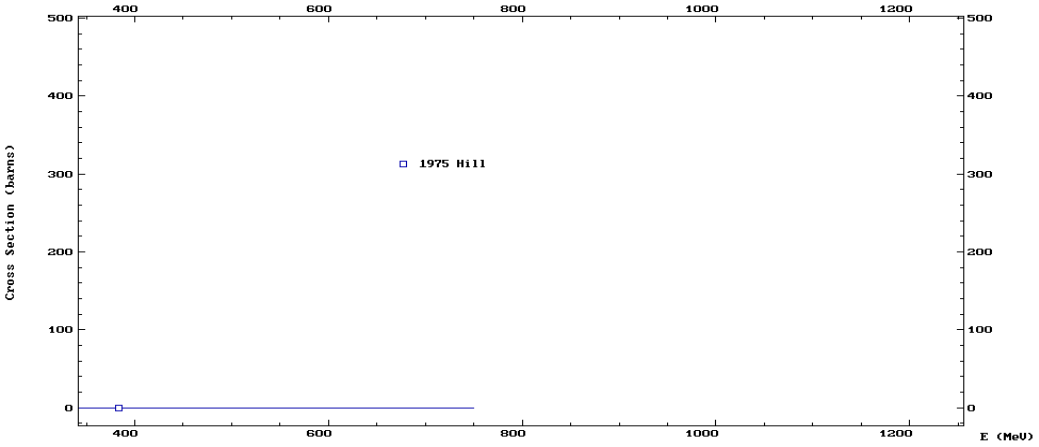


Figura 348. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,n+3P)30-ZN-72

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del arsénico con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
33-AS-75(n,g)33-AS-76	Desde 10-8 hasta 10 MeV	Desde 10-4 hasta50	De interés
33-AS-75(n,2n)33-AS-74	Por encima del rango de energía de los neutrones de la fuente de Am		Sin interés
33-AS-75(n,α)31-GA-72	Una parte dentro del rango	Entre 10 -4 y 10 -2	Poco interés
33-AS-75(N,2P)31-GA-74	Por encima del rango		Sin interés
33-AS-75(n,EL),,	Por debajo del rango de interés		Sin interés
33-AS-75(n,n+2P)31-GA-73	Muy por encima del rango de interés		Sin interés
33-AS-75(n,p)32-GE-75	En parte en la zona de interés	Hasta 0.02	Decaimiento 82.78 m

Tabla 133. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del arsénico con los neutrones.

5.10.1.1. Reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76

El As 76 es un isótopo que tiene las siguientes características:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q(keV)	Núcleo hijo
$^{76}_{33}As$	0.0	2-	26.24 h *9*	β^-: 100 %	2962.0 *8*	$^{76}_{34}Se$

Tabla 134. Sección eficaz de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76.

Y que emite:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Energía (keV)Energía punto final (keV)
85,6	292,2	0,54 %	4,6E-4
90,4	306,7	1,03 %	9,3E-4
139,6	447,3	0,027 %	3,8E-5
171,1	532,9	1,69 %	0,00289
196,2	599,1	0,070 %	1,37E-4
202,4	615,1	0,022 %	4E-5
272,3	791,4	0,0036 %	1,0E-5
290,0	835,0	0,006 %	1,7E-5
354,4	936,0	0,0036 %0	1,3E-5
393,1	1080,8	0,04 %	1,4E-4
433,4	1174,3	1,77 %	0,0077
476,4	1273,1	0,023 %	1,1E-4
653,0	1631,2	0,054 %	3,5E-4
688,5	1745,8	7,5 %	0,052
746,1	1839,7	0,81 %	0,0060
993,2	2402,9	35,2 %	0,350
1263,8	2962,0	51,0 %	0,64

Tabla 135. Energía de la emisión β de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76

- Emisión Radiación X y γ:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)	Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
302,2	0,0090 %	2,7E-5	980,9	0,0414 %	4,06E-4
358,4	0,014 %	4,8E-5	1030,6	9E-4 %	9E-6
403,2	0,0234 %	9,4E-5	1098,2	0,0036 %	4,0E-5
437,3	0,0014 %	5,9E-6	1129,87	0,126 %	0,00142
456,9	0,0356 %	1,62E-4	1130	0,018 %	2,0E-4
466,5	0,005 %	2,1E-5	1212,92	1,44 %	0,0175
472,8	0,050 %	2,34E-4	1216,08	3,42 %	0,0416
484,8	0,0059 %	2,8E-5	1228,52	1,22 %	0,0149
559,10	45 %	0,251595	1439,10	0,279 %	0,00402
563,23	1,20 %	0,0068	1453,62	0,108 %	0,00157
571,5	0,140 %	8,0E-4	1467,0	9E-4 %	1,3E-5
575,30	0,068 %	3,9E-4	1532,8	0,0243 %	3,72E-4
639,5	0,0036 %	2,3E-5	1567,9	0,0077 %	1,20E-4
657,05	6,2 %	0,0405	1611,2	0,0077 %	1,23E-4
665	0,04 %	2,4E-4	1787,66	0,293 %	0,0052
665,34	0,36 %	0,00243	1805	0,0014 %	2,4E-5
695,2	0,0090 %	6,3E-5	1870,00	0,054 %	0,00101
727,00	0,0185 %	1,34E-4	1881,3	9E-4 %	1,7E-5
740,10	0,117 %	8,7E-4	1955,7	0,0090 %	1,76E-4
771,74	0,122 %	9,4E-4	2096,30	0,55 %	0,0115
797,0	0,005 %	4E-5	2110,80	0,329 %	0,0069
809,8	0,0171 %	1,38E-4	2127,0	0,0014 %	2,9E-5
867,64	0,131 %	0,00113	2429,00	0,032 %	7,7E-4
882,13	0,059 %	5,2E-4	2655,30	0,0437 %	0,00116
954,6	0,0018 %	1,7E-5	2669,7	2,7E-4 %	7,2E-6

Tabla 136. Emisión X y γ de la reacción 33-AS-75(n,g)33-AS-76

Con el siguiente esquema de decaimiento:

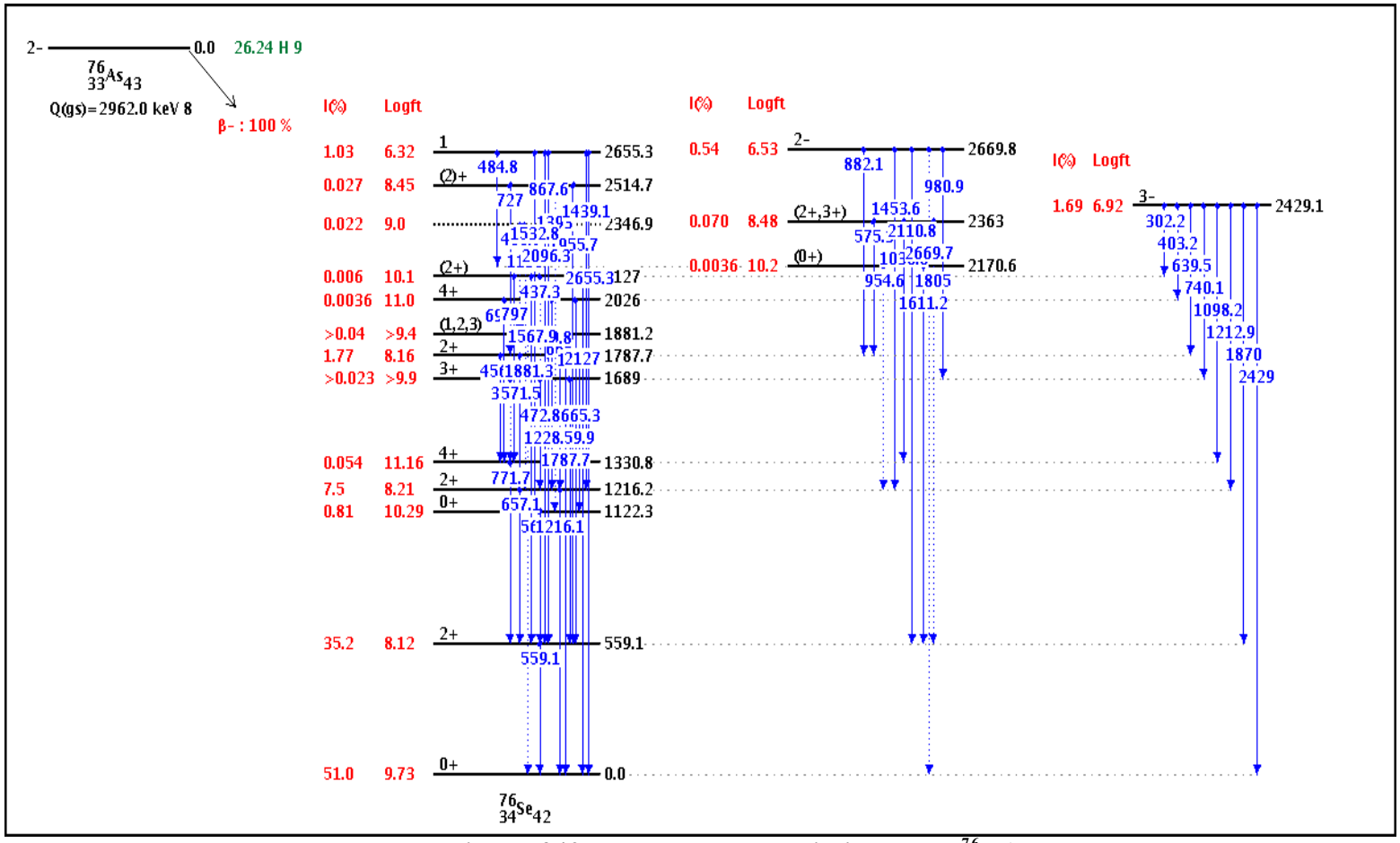


Figura 349. Esquema de decaimiento del $^{76}_{33}As$

5.10.1.2. Reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72

El Ga 72 tiene las siguientes características radiactivas:

Núcleo padre	Energía del padre(nivel))	Jn padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{72}_{31}$Ga	0	3-	14.10 h *1*	β^-: 100 %	4001.1 *23*	$^{72}_{32}$Ge

Tabla 137. Modo 1 de decaimiento del $^{72}_{31}$Ga.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
51,8	185,9	0,055 %	2,8E-5
70,2	243,9	0,150 %	1,05E-4
86,6	294,0	0,040 %	3,5E-5
96,4	323,0	0,78 %	7,5E-4
116,7	381,6	0,040 %	4,7E-5
135,9	435,2	0,230 %	3,13E-4
176,8	545,8	0,340 %	6,01E-4
182,9	561,7	0,300 %	5,5E-4
220,7	659,3	15,00 %	0,0331
222,1	663,0	0,0030 %	6,7E-6
227,3	676,1	21,7 %	0,0493
321,2	907,0	0,009 %	3E-5
345,7	965,5	27,7 %	0,0958
381,9	1050,8	0,0040 %	1,5E-5
384,9	1057,6	1,87 %	0,00720
466,9	1246,8	0,040 %	1,9E-4
542,5	1417,6	0,014 %	7,6E-5
573,2	1486,3	8,90 %	0,0510
596,1	1537,2	0,15 %	8,9E-4
623,9	1598,7	0,310 %	0,00193
778,4	1936,1	2,99 %	0,0233
935,1	2272,8	0,80 %	0,0075
1059,4	2537,1	8,5 %	0,090
1358,9	3167,1	10,3 % *8*	0,140

Tabla 138. Energía de la emisión β de 33-AS-75(n,α)31-GA-72.

- Emisión de Electrones:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	1,19	0,0609 %	7,25E-7
Auger K	8,56	0,02213 %	1,894E-6
CE K	131,43	0,00189 %	2,48E-6
CE L	141,12	2,22E-4 %	3,13E-7
CE K	822,93	0,0469 %	3,85613E-4

Tabla 139. Energía de los electrones en la reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72

- Radiación γ y X:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis MeV/Bq-s
XR l	1,19	8,7E-4 %	1,03E-8
XR kα2	9,855	0,0078 %	7,7E-7
XR kα1	9,886	0,0153 %	1,51E-6
XR kβ3	10,975	1,00E-3 %	1,10E-7
XR kβ1	10,982	0,00194 %	2,13E-7
XR kβ2	11,101	4,73E-5 %	5,25E-9
	50,88	0,0100 %	5,1E-6
	112,52	0,136 %	1,53E-4
	113,5	0,0057 %	6,5E-6
	142,53	0,0109 %	1,55E-5
	230,6	0,023 %	5,3E-5
	289,31	0,191 %	5,5E-4
	306,0	0,0210 %	6,4E-5
	317,5	0,0220 %	7,0E-5
	336,63	0,107 %	3,61E-4
	381,24	0,273 %	0,001039
	401,3	0,0325 %	1,30E-4
	428,42	0,198 %	8,5E-4
	449,55	0,094 %	4,2E-4
	479,23	0,091 % 9	4,4E-4
	495,88	0,056 %	2,80E-4
	520,74	0,055 % 5	2,84E-4
	587,44	0,121 % 7	7,1E-4
	600,95	5,54 %	0,0333
	629,96	24,8 %	0,156
	691,2	0,50 %	0,0034
	735,75	0,367 %	0,00270
	738,5	0,055 %	4,0E-4
	772 1	0,043 %	3,3E-4
	786,44	3,20 %	0,0252
	810,20	2,01 %	0,0163
	834,03	95,63 %	0,79758
	861,11	0,913 %	0,00786
	878,32	0,073 %	6,4E-4
	894,25	9,88 %	0,0883
	924,22	0,142 %	0,00132
	938,4	0,077 %	7,2E-4
	939,36	0,259 %	0,00243
	970,55	1,104 %	0,01071
	975,5	0,033 %	3,3E-4
	999,86	0,799 %	0,00798
	1037,2	0,0210 %	2,18E-4
	1050,69	6,91 %	0,0726
	1155,7	0,0105 %	1,22E-4
	1163,12	0,075 %	8,7E-4

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis MeV/Bq-s
	1192,4	0,035 %	4,2E-4
	1215,15	0,789 %	0,00959
	1230,86	1,454 %	0,01789
	1260,10	1,13 %	0,0142
	1276,76	1,565 %	0,01997
	1390,42	0,085 %	0,00118
	1464,00	3,55 %	0,0519
	1500,9	0,0191 %	2,87E-4
	1568,1	0,199 %	0,00312
	1571,60	0,818 %	0,0128
	1596,68	4,24 %	0,0676
	1613,6	0,039 %	6,3E-4
	1630 1	0,033 %	5,3E-4
	1680,77	0,90 %	0,0151
	1710,90	0,388 %	0,00664
	1711,15	0,045 %	7,7E-4
	1837,6	0,209 %	0,00385
	1861,09	5,25 %	0,0977
	1877,90	0,231 %	0,00435
	1920,20	0,158 %	0,00303
	1991,3	0,112 %	0,00223
	2029,4	0,123 %	0,00250
	2109,50	1,042 %	0,0220
	2201,66	25,9 %	0,571
	2214,3	0,178 %	0,0039
	2402,2	0,0239 %	5,7E-4
	2404,3	0,015 %	3,7E-4
	2490,9	7,68 %	0,191
	2507,79	12,78 %	0,320
	2515,0	0,250 %	0,00628
	2583,4	0,014 %	3,7E-4
	2605,5	0,018 %	4,7E-4
	2621,06	0,132 %	0,00346
	2633,9	0,0145 %	3,8E-4
	2785,1	0,0297 %	8,3E-4
	2844,00	0,43 %	0,0122
	2939,6	0,0105 %	3,1E-4
	2942,4	0,026 %	7,6E-4
	2950,0	0,0038 %	1,1E-4
	2981,14	0,055 %	0,00162
	3034,6	0,0046 %	1,4E-4
	3093,7	0,0167 %	5,2E-4
	3324,6	0,0031 %	1,0E-4
	3338,3	0,0033 %	1,1E-4

Tabla 140. Energía de emisión γ y X de la reacción 33-AS-75(n,α)31-GA-72

5.10.1.3. Reacción 33-AS-75(n,p)32-GE-75

El producto de esta reacción, el $^{75}_{32}$ Ge tiene tres modos de decaimiento posibles:

[1] Modo 1

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{75}_{32}$Ge	139.68 3	7/2+	47.7 s 5	β-	1176.6 10	$^{75}_{33}$As

Tabla 141. Modo 1 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
324.6 8	915.8 10	0.030 % 8	1.0E-4 3

Tabla 142. Emisión β- del modo 1 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge

- Emisión X y γ.:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
121,15	0,005 %	6E-6
136,01	0,020 %	2,7E-5
279,48	0,0043 %	1,2E-5
400,20	0,0039 %	1,6E-5

Tabla 143. Emisión γ y X del modo 1 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

[2] Modo 2

Núcleo padre	Energía del padre(nivel)	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{75}_{32}$Ge	139.68	7/2+	47.7 s *5*	IT		$^{75}_{32}$Ge

Tabla 144. Modo 2 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

- Emisión de electrones:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	1,19	69,90 %	8,318E-4
Auger K	8,56	22,51 %	0,001927
CE K	128,58 *3*	49,6 %	0,063755
CE L	138,27	8,27 %	0,0114311

Tabla 145. Energía de la emisión de electrones del modo 2 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

- Emisión γ y X:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	1,19	0,99 %	1,18E-5
XR kα2	9,855	8,0	7,9E-4
XR kα1	9,886	15,5 %	0,00153
XR kβ3	10,975	1,02 %	1,12E-4
XR kβ1	10,982	1,97 %	2,17E-4
XR kβ2	11,101	0,0481 %	5,34E-6
	61,92	0,0118 %	7,3E-6
	77,86	0,0031 %	2,5E-6
	139,68	39,4	0,054976

Tabla 146. Energía de la emisión X y γ del $^{75}_{32}$ Ge.

[3] Modo 3.

Núcleo padre	Energía del padre (nivel)	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{75}_{32}$Ge	0	1/2-	82.78 m	β^-: 100 %	1176.6	$^{75}_{33}$As

Tabla 147. Modo 3 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
181,4	558,9	0,32 %	5,8,E-4
239,3	707,8	0,225 %	5,4E-4
290,4	776,0	5E-4 %	1,5E-6
322,5	912,0	11,5 %	0,037
350,2	978,0	0,86 %	0,0030
435,3	1176,6	87,1 %	0,379

Tabla 148. Energía de la emisión β del modo 3 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

- Energía Gamma y X.

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
66,0	0,114 %	7,5E-5
136	4E-4 %	5E-7
198,6	1,19 %	0,00235
204,26	6E-4 %	1,2E-6
264,6	11,4 %	0,030164
270,2	0,0034 %	9E-6
279,7	0,0057 %	1,6E-5
338,0	0,0046 %	1,5E-5
353,0	0,0205 %	7,2E-5
419,1	0,185 %	7,7E-4
468,8	0,223 %	0,00105
617,7	0,114 %	7,0E-4

Tabla 149. Emisión γ del modo 3 de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

con el siguiente esquema de decaimiento:

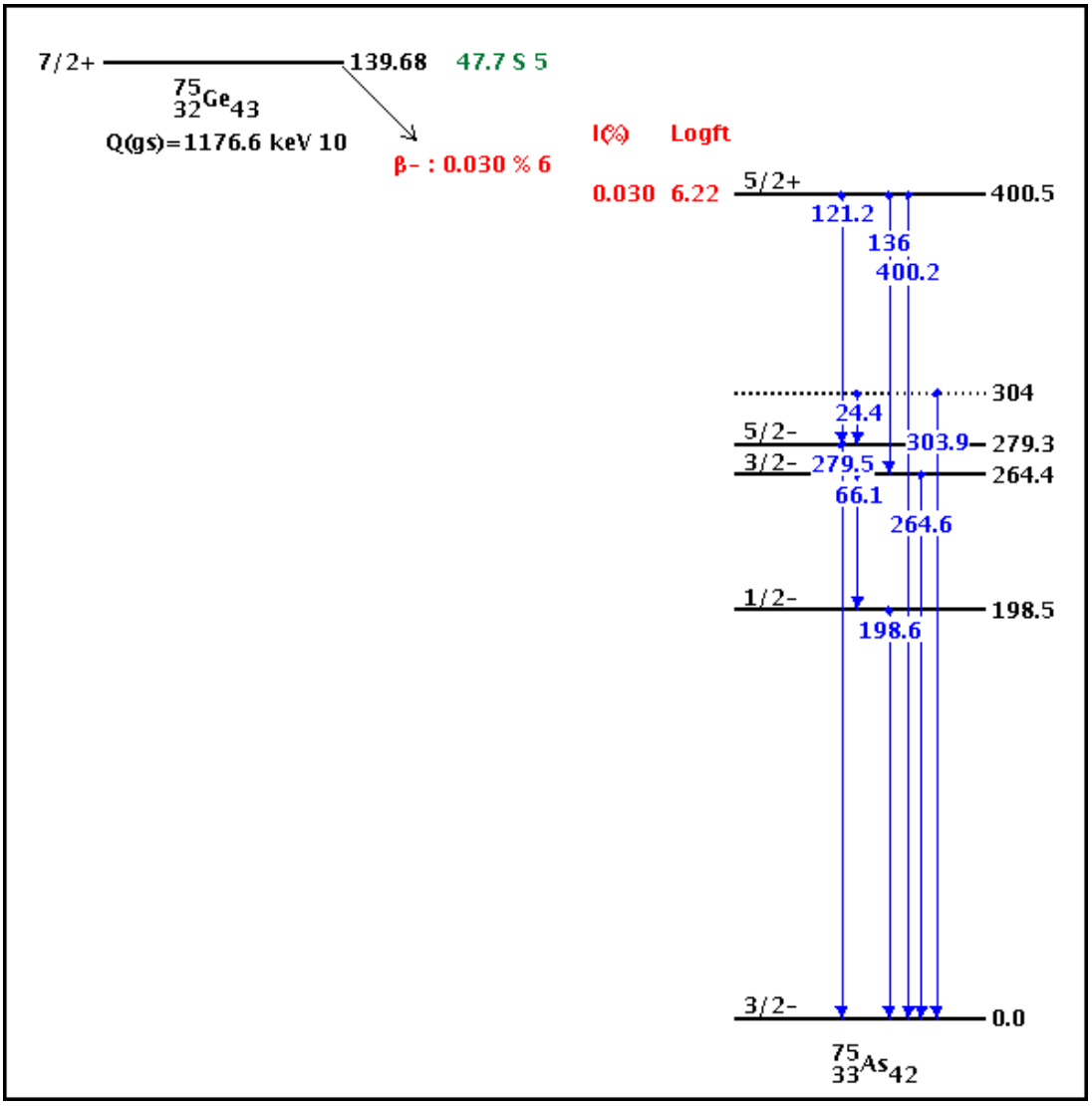


Figura 350. Esquema de decaimiento del $^{75}_{32}$ Ge.

Las secciones eficaces de las reacciones mencionadas anteriormente se reflejan en la siguiente figura:

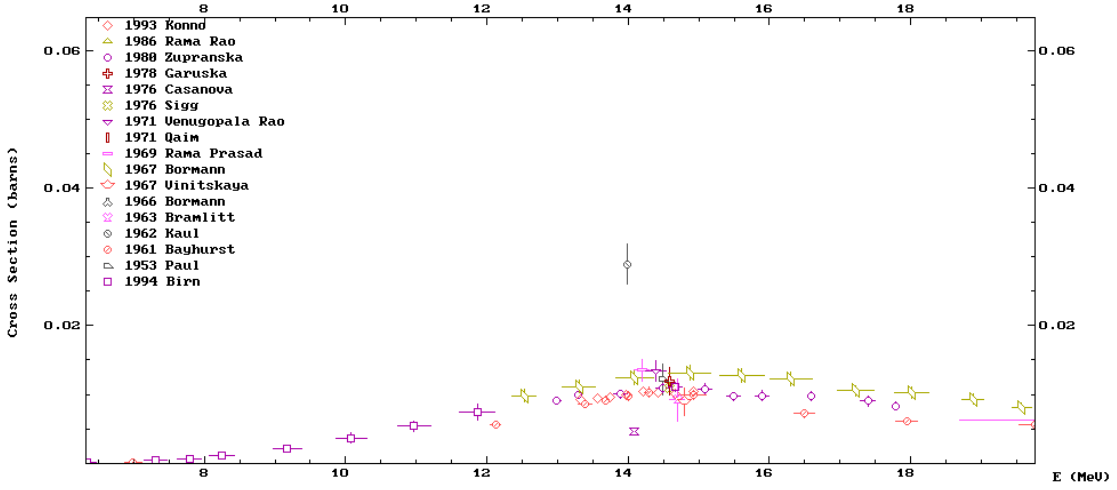


Figura 351. Sección eficaz de la reacción 33-As-75(n,α)31Ga-72

5.10.2. Conclusiones de las reacciones del Arsénico con los neutrones.

[1] Existen tres posibles reacciones del arsénico con los neutrones que producen As76, Ga 72 y Ge 75. Estas reacciones son:

- 33-AS-75(n,g)33-AS-76
- 33-AS-75(n,α)31-GA-72
- 33-AS-75(n,p)32-GE-75

[2] Los productos de reacción dan lugar a decaimientos tipo β.

[3] El rango de energías donde se mueven las radiaciones gamma asociadas al decaimiento β está comprendido entre 0,3 y 1,3 MeV.,

[4] El bajo valor de las secciones eficaces de estas tres reacciones para el rango de energías de neutrones producido por la fuente de Americio Berilio permite concluir que no va a afectar el espectro de la reacción del flúor.

5.11. Estudio del Hg.

Sus isótopos son:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{194}Hg	0	194	0	520y	EC
^{196}Hg	0,146	195,966	0	--	estable
^{197}Hg	0	197	1/2	2,672d	EC
^{197}Hgm	0	197	15/2	23,8h	IT,EC
^{198}Hg	10,02	197,967	0	--	estable
^{199}Hg	16,4	198,968	1/2	--	estable
^{200}Hg	23,13	199,968	0	--	estable
^{201}Hg	13,22	200,97	3/2	--	estable
^{202}Hg	29,8	201,971	0	--	estable
^{203}Hg	0	203	5/2	46,61d	β^-
^{204}Hg	6,85	202,974	0	--	estable
^{206}Hg	0	206	0	8,2m	β^-

Tabla 150. Isótopos del Hg.

5.11.1. Reacciones del 198Hg con los neutrones.

[1] 80-Hg-198(n,2n)80-Hg-197-M. La sección eficaz es:

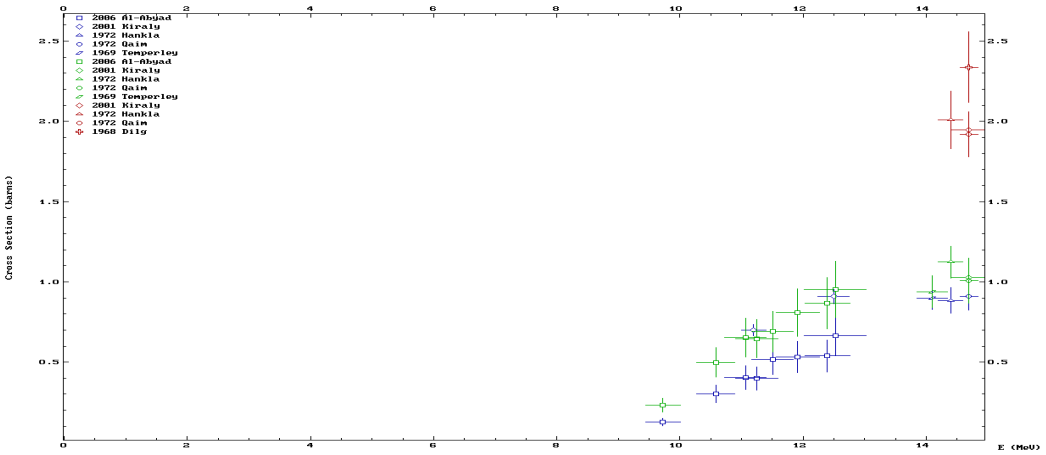


Figura 352. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,2n)80-Hg-197-M

[2] 80-Hg-198(n,g)80-Hg-199. La sección eficaz correspondiente es

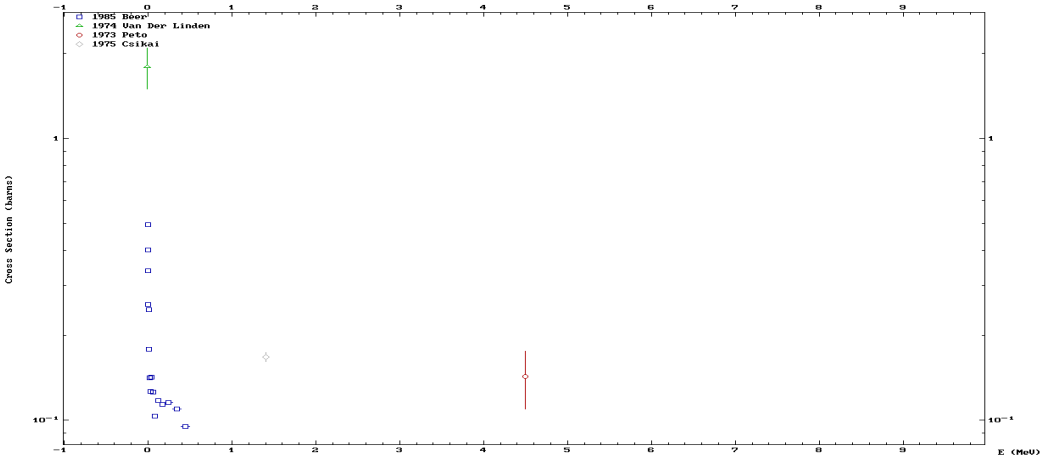


Figura 353. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,g)80-Hg-199

[3] 80-Hg-198(n,INL)80-Hg-198. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

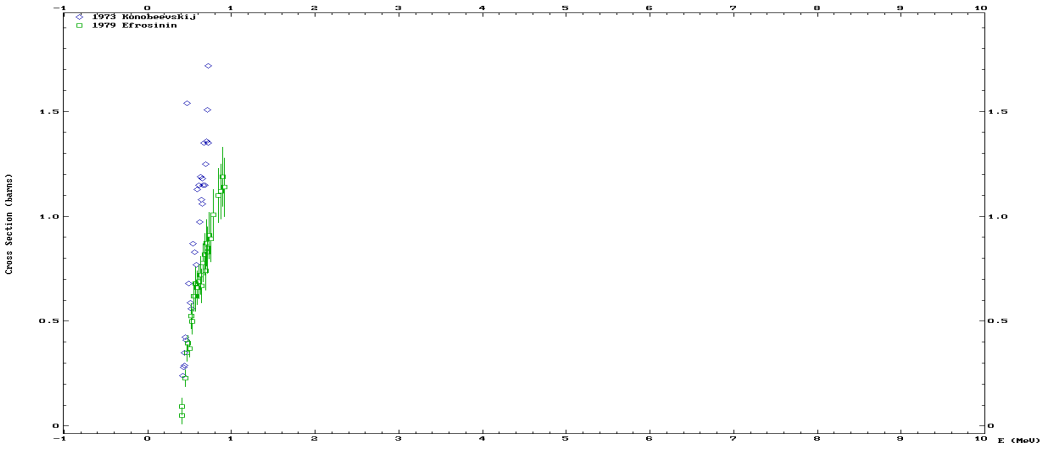


Figura 354. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,INL)80-Hg-198

[4] 80-Hg-198(n,n+p)79-Au-198-G. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

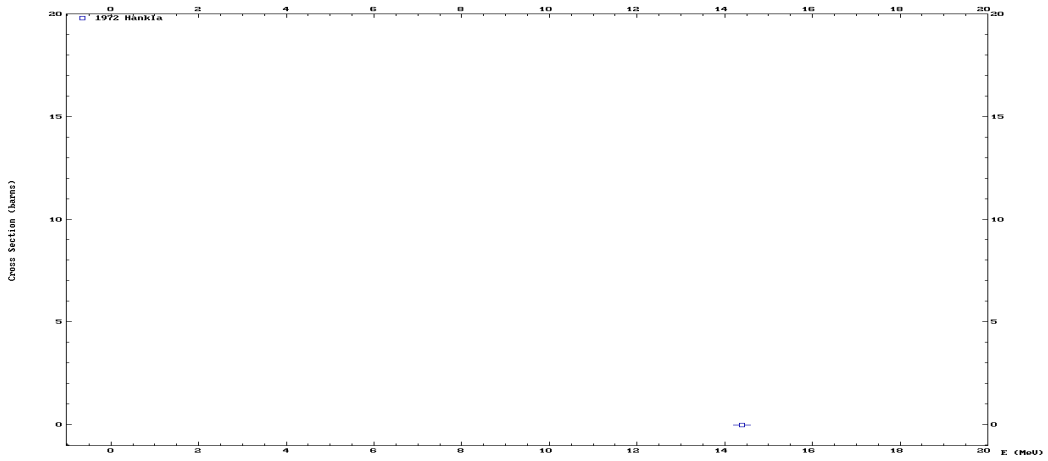


Figura 355. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,n+p)79-Au-198-G

[5] 80-Hg-198(n,p)79-Au-198-G. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

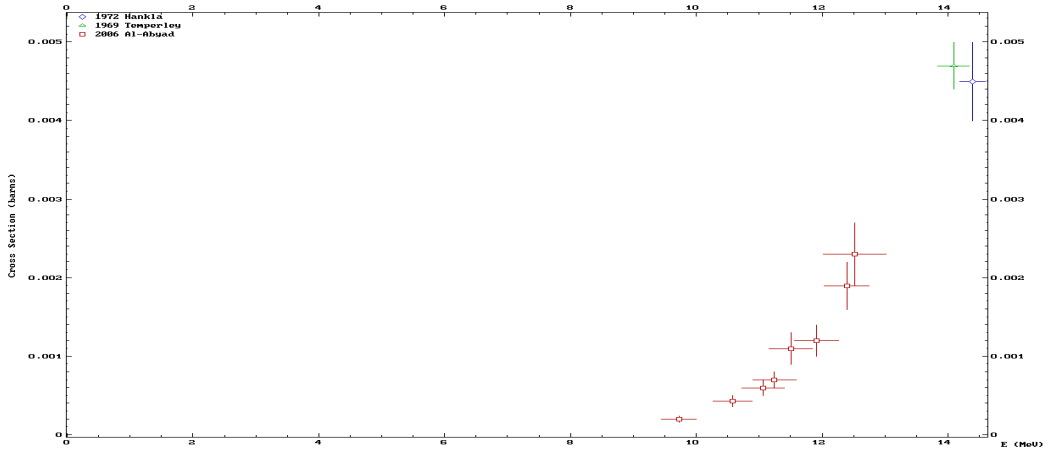


Figura 356. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-198(n,p)79-Au-198-G

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 198Hg con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
80-Hg-198(n,g)80-Hg-199	4,5 MeV	0,15 Barns	De interes

Tabla 151. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 198Hg con los neutrones.

5.11.1.1. Reacción 80-Hg-198(n,g)80-Hg-199.

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre (nivel)	Jπ padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{199}_{80}Hg$	532.48	13/2+	42.67 m	IT: 100 %		$^{199}_{80}Hg$

Tabla 152. Características de decaimiento del 80Hg199.

- Emisión de electrones:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	7,6	67	0,00506
CE K	35,4977	0,00209	7,4E-7
Auger K	53,8	2,4	0,00131
CE K	75,20	15,5	0,01164
CE L	103,7607	0,0181	1,88E-5
CE M	115,0384	0,005	6,8E-6
CE NP	117,7997	0,00207	2,44E-6
CE L	143,46	24,1	0,0346
CE M	154,74	6,24	0,00965
CE NP	157,50	1,96	0,00308
CE K	291,00	49	0,142
CE K	330,30	8,1E-4	2,68E-6
CE L	359,26	26,8	0,096
CE M	370,54	7,2	0,0269
CE NP	373,30	2,35	0,0088
CE L	398,56	2,86E-4	1,14E-6
CE M	409,84	7,1E-5	2,91E-7
CE NP	412,60	2,23E-5	9,2E-8

Tabla 153. Emisión de electrones del 80Hg199.

- Emisión Gamma y X.:

Energy (keV)		Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR I	9,99	36,7	0,00366
XR kα2	68,894	17,7	0,0122
XR kα1	70,818	29,8	0,0211
XR kβ3	79,824	3,60	0,00287
XR kβ1	80,225	6,9	0,0055
XR kβ2	82,473	2,49	0,00205
	118,6	1,22E-5	1,45E-8
	158,3	52,3	0,0828
	255,2	0,0013	3E-6
	374,1	13,8	0,051
	413,4	0,0272	1,12E-4

Tabla 154. Emisión X y γ de 80Hg199.

5.11.2. Reacciones del 199Hg con los neutrones.

[1] 80-Hg-199(n,n+p)79-Au-198-G. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

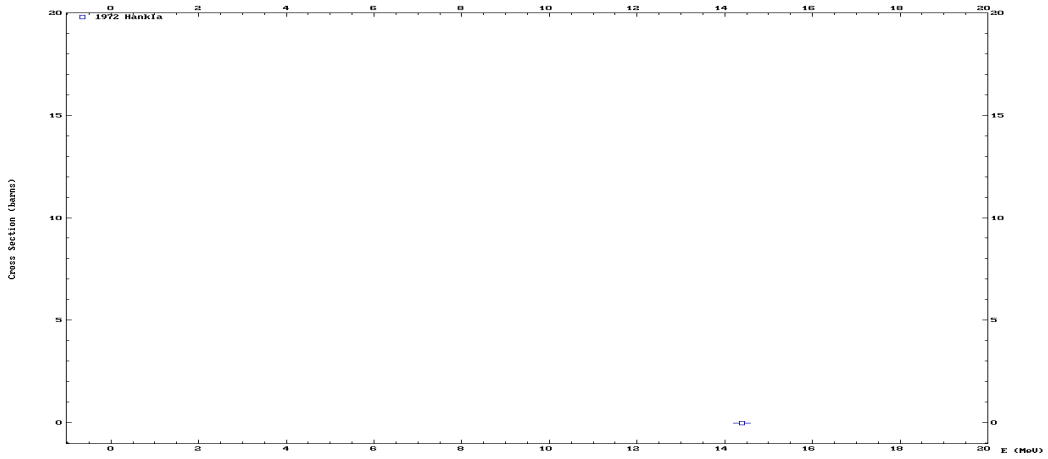


Figura 357. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-199(n,n+p)79-Au-198-G

[2] 80-Hg-199(n,INL)80-Hg-199-M. Sus secciones eficaces son:

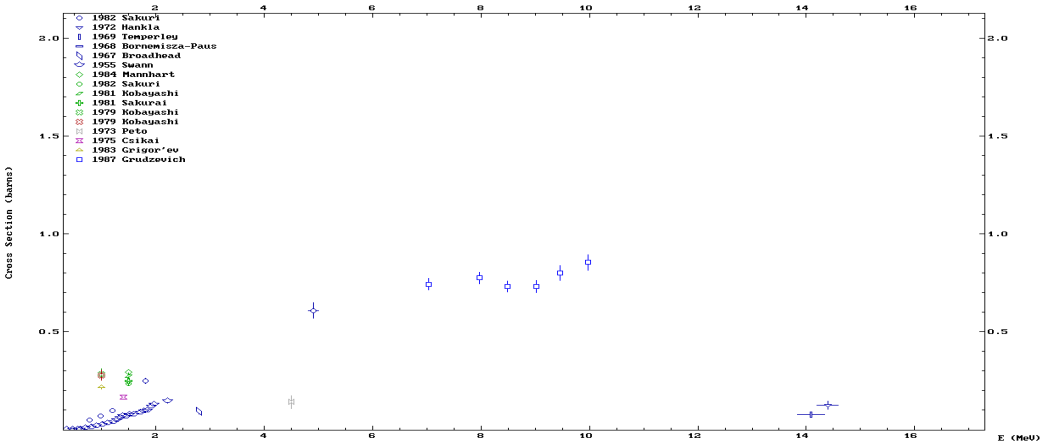


Figura 358. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-199(n,INL)80-Hg-199-M

[3] 80-Hg-199(n,n+p)79-Au-198-G. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

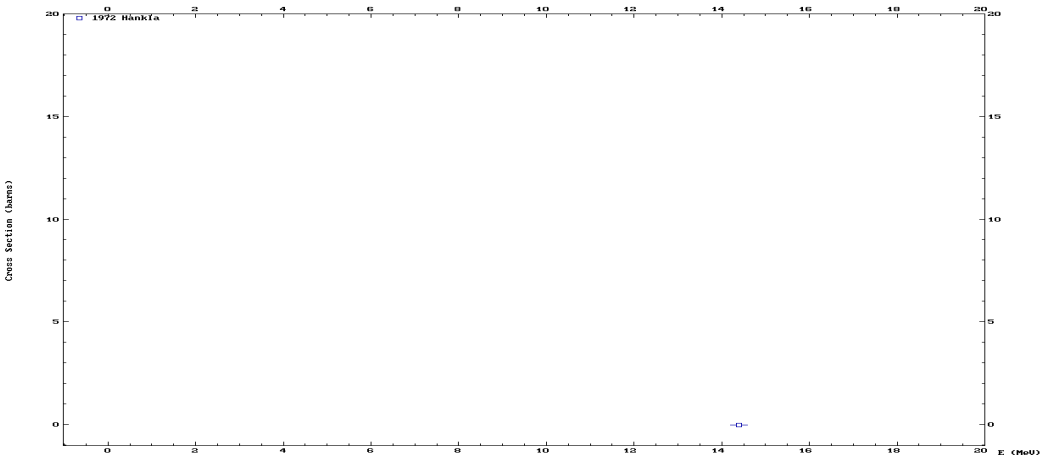


Figura 359. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-199(n,n+p)79-Au-198-G

En resumen, del estudio de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 199Hg con los neutrones se deduce que carecen de interés en la activación de la fluorita.

5.11.3. Reacciones del 200Hg con los neutrones.

[1] 80-Hg-200(n,2n)80-Hg-199-M. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

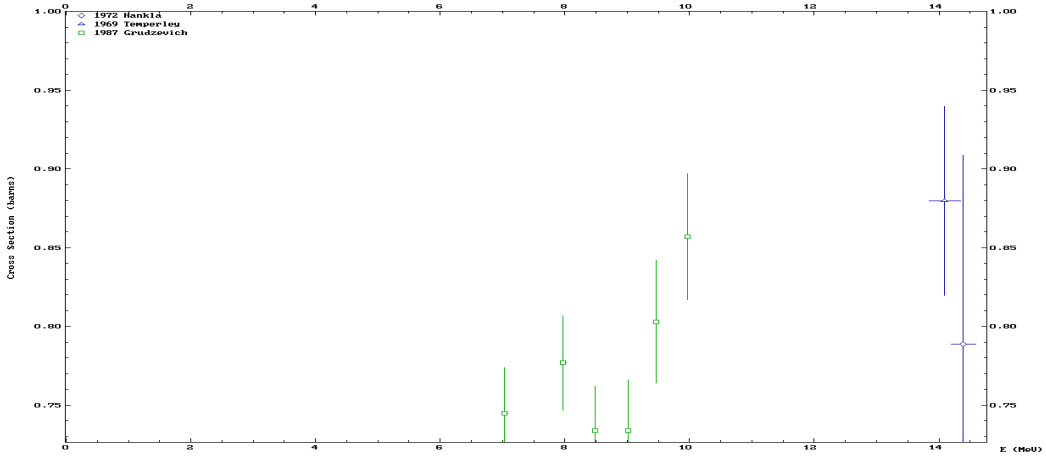


Figura 360. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,2n)80-Hg-199-M

[2] 80-Hg-200(n,α)78-Pt-197. Con las siguientes secciones eficaces.

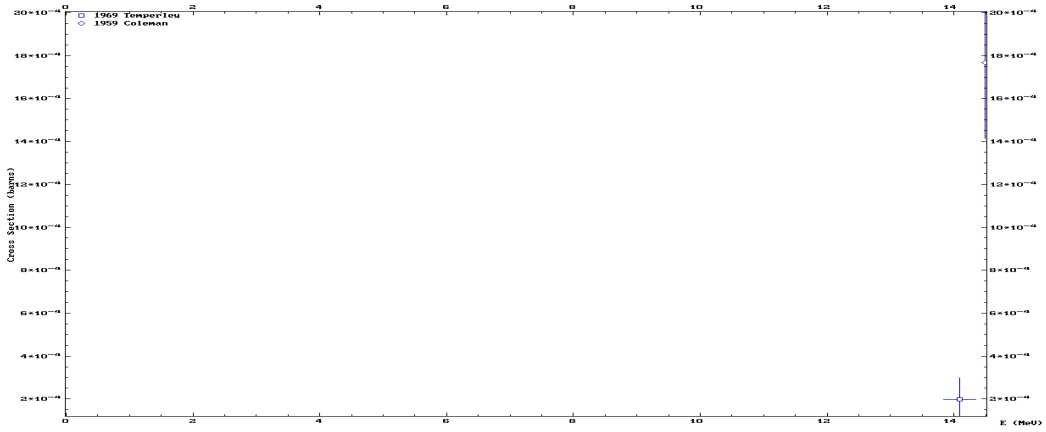


Figura 361. Sección eficaz de la reacción -Hg-200(n,α)78-Pt-197

[3] 80-Hg-200(n,n+p)79-Au-199. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

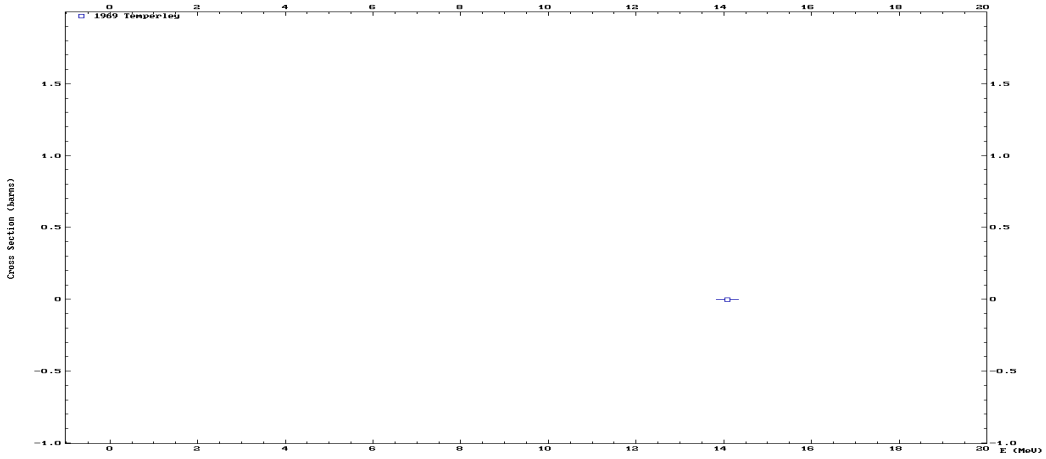


Figura 362. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,n+p)79-Au-199

[4] 80-Hg-200(n,g)80-Hg-201. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

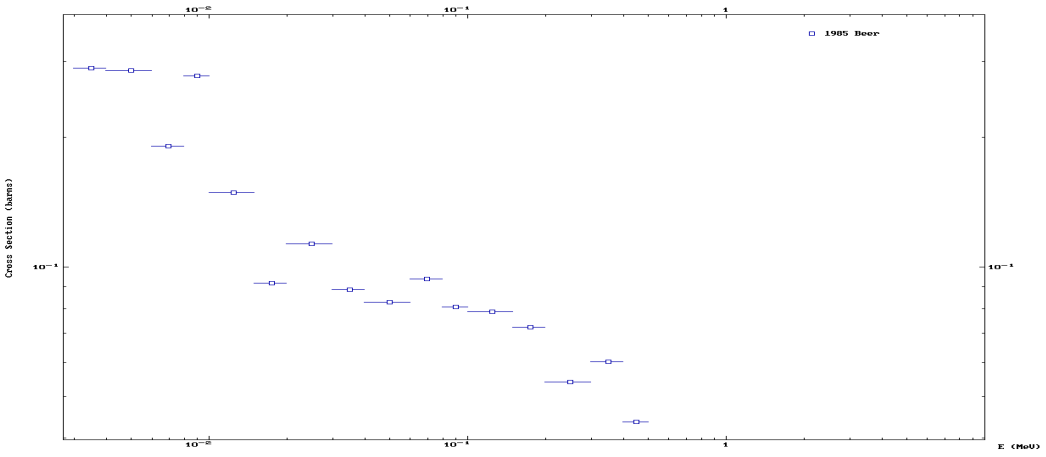


Figura 363. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,g)80-Hg-201

[5] 80-Hg-200(n,INL)80-Hg-200. La sección eficaz es

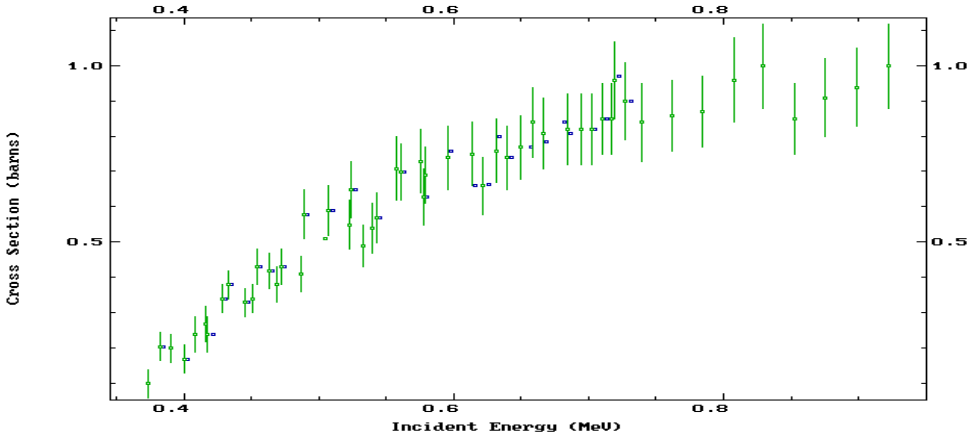


Figura 364. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,INL)80-Hg-200

[6] 80-Hg-200(n,p)79-Au-200. La sección eficaz correspondiente es

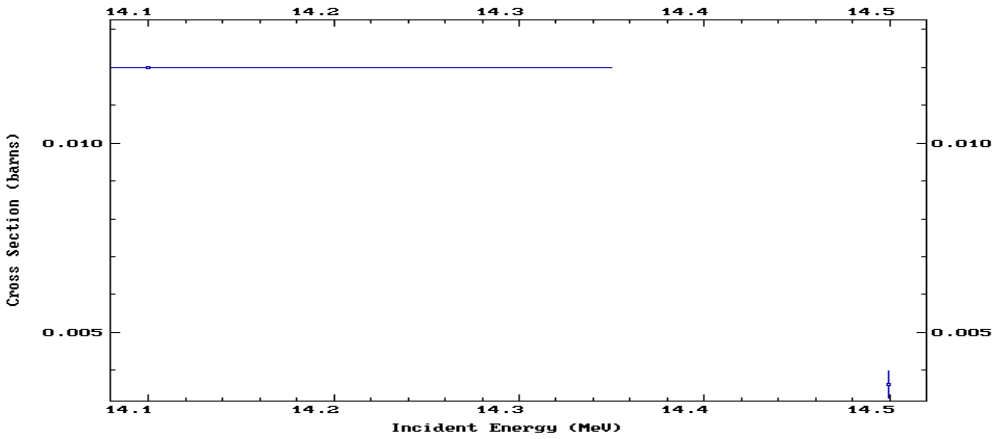


Figura 365. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,p)79-Au-200

En resumen, no hay ninguna reacción de interés en el rango de energías de la fuente de neutrones.

5.11.4. Reacciones del 201Hg con los neutrones.

[1] 80-Hg-201(n,n+p)79-Au-200. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

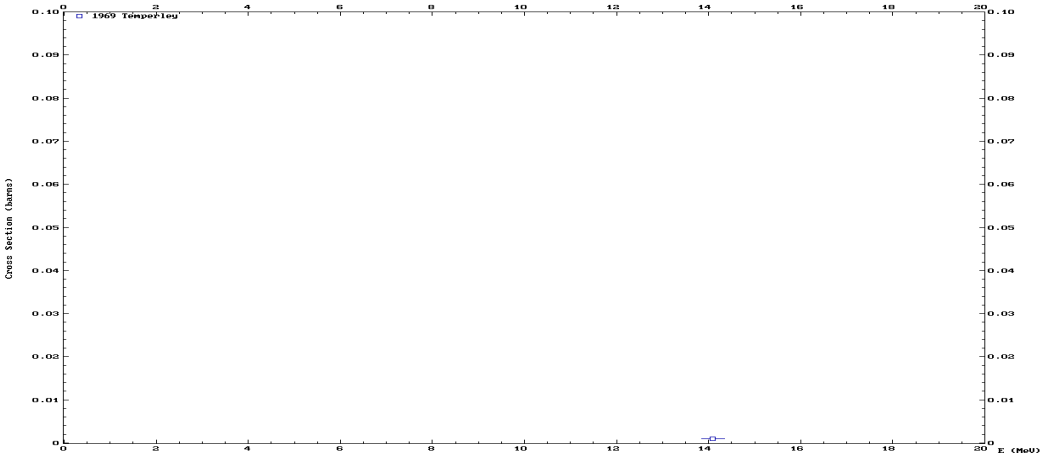


Figura 366. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-201(n,n+p)79-Au-200

[2] 80-Hg-201(n,g)80-Hg-202. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

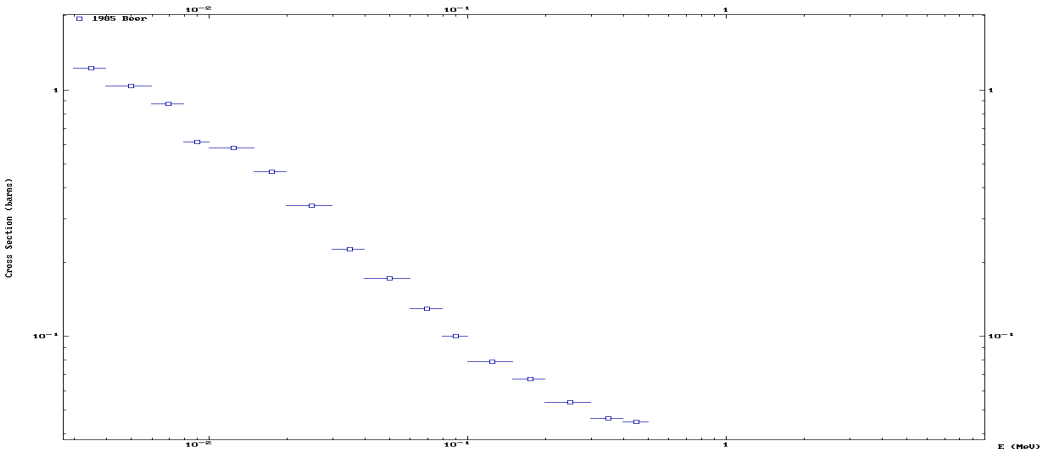


Figura 367. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-201(n,g)80-Hg-202

[3] 80-Hg-200(n,n+p)79-Au-200. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

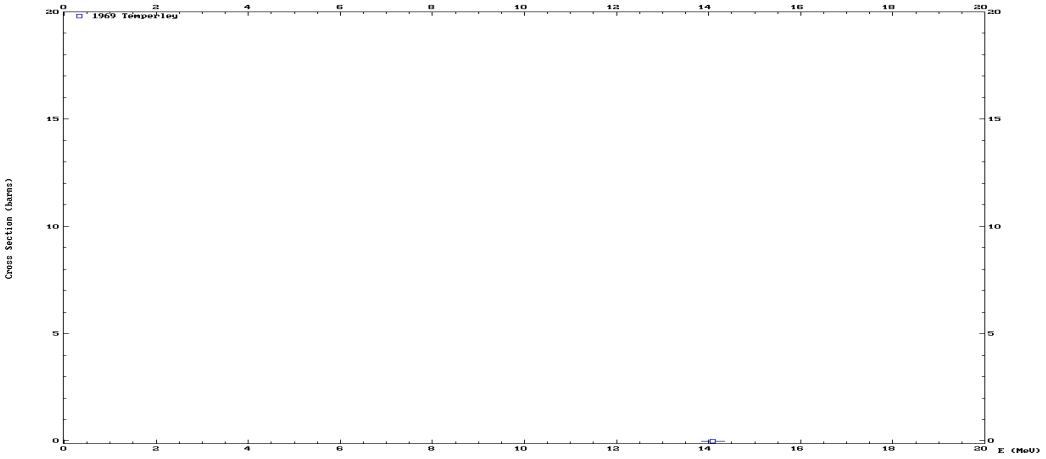


Figura 368. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,n+p)79-Au-200

[4] 80-Hg-201(n,p)79-Au-201. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

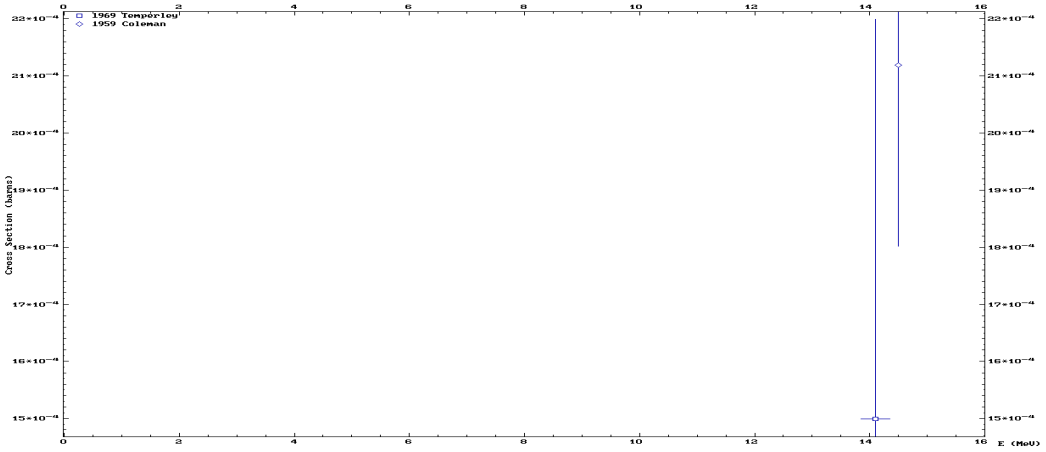


Figura 369. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-201(n,p)79-Au-201

[5] 80-Hg-200(n,TOT). Sus secciones eficaces son:

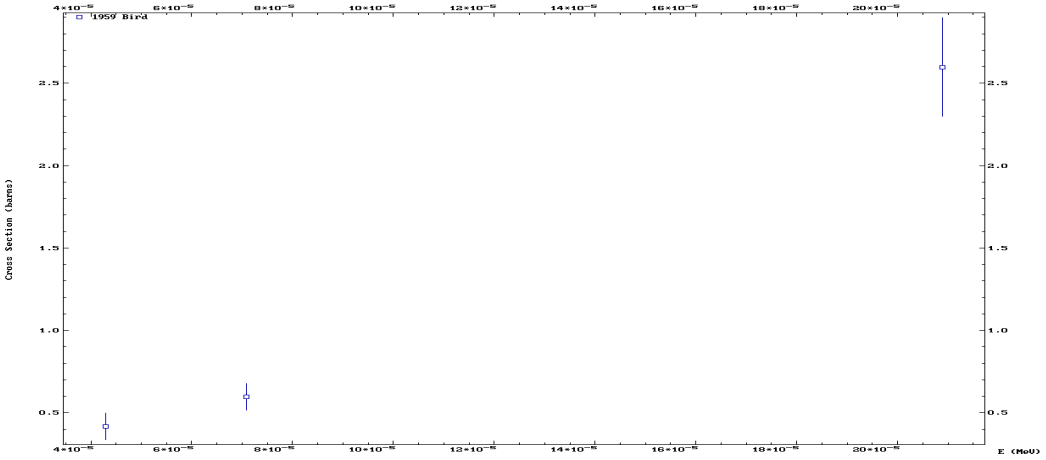


Figura 370. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-200(n,TOT)

En resumen, con la energía de la fuente de neutrones de Americio Berilio no se espera que se produzcan reacciones de interés con el 80Hg200.

5.11.5. Reacciones del 202Hg con los neutrones.

[1] 80-Hg-202(n,α)78-Pt-199. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

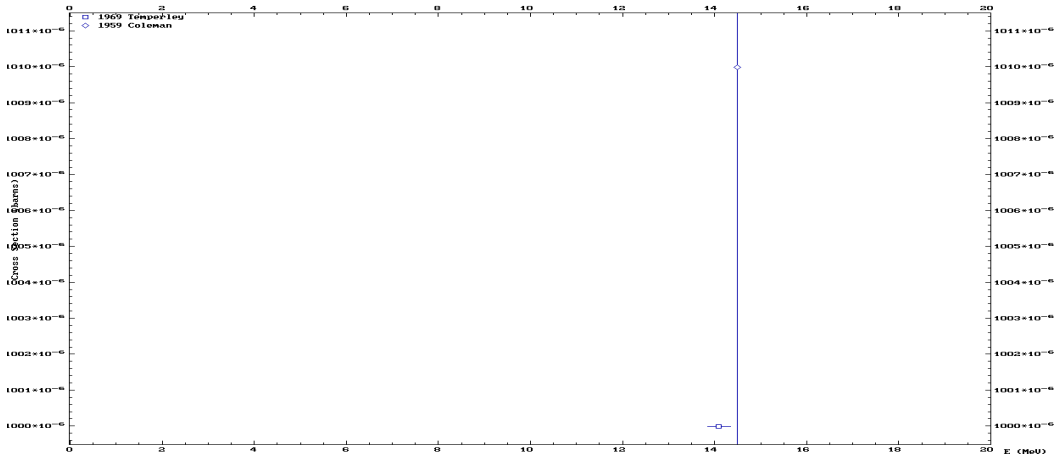


Figura 371. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-202(n,α)78-Pt-199

[2] 80-Hg-202(n,g)80-Hg-203. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

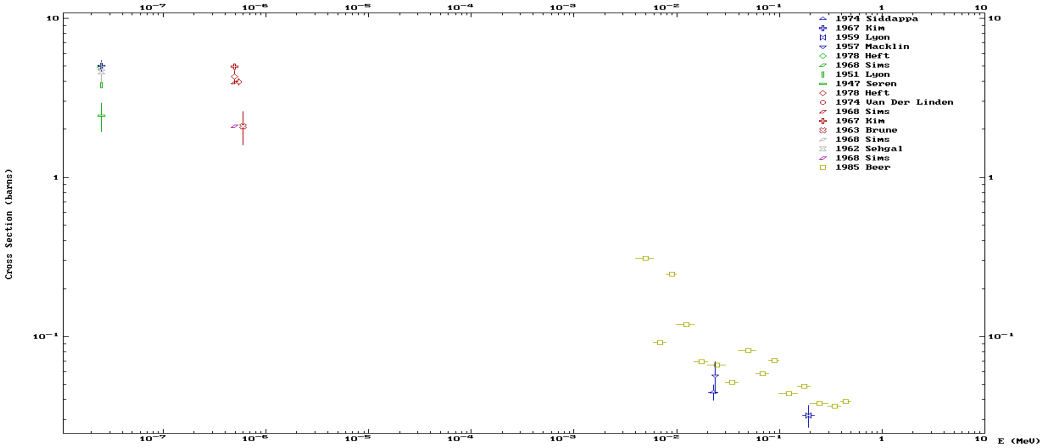


Figura 372. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-202(n,g)80-Hg-203

[3] 80-Hg-202(n,INL)80-Hg-202. Con las siguientes secciones eficaces.

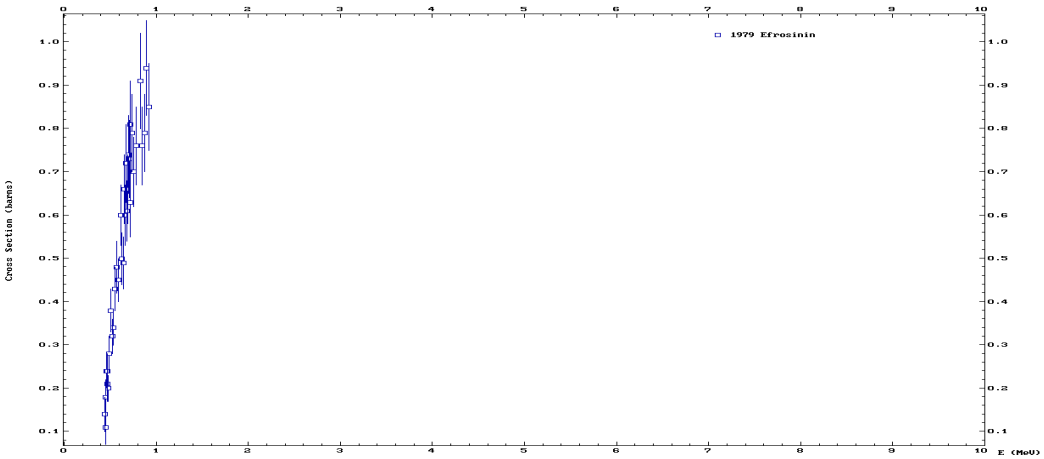


Figura 373. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-202(n,INL)80-Hg-202

En resumen, con la energía de los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio, no se produce ninguna reacción de interés con el 80Hg202.

5.11.6. Reacciones del 204Hg con los neutrones.

[1] 80-Hg-204(n,2n)80-Hg-203. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

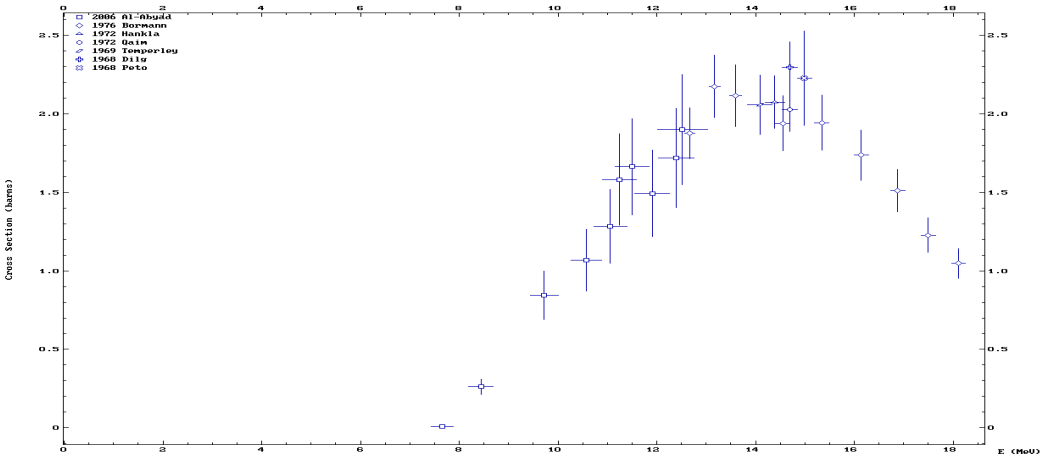


Figura 374. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,2n)80-Hg-203

[4] 80-Hg-204(n,α)78-Pt-201. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

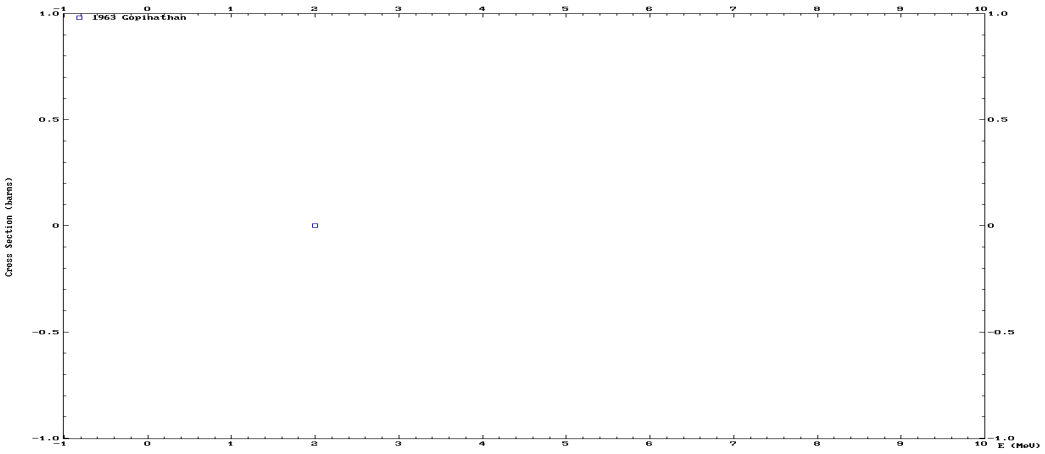


Figura 375. 80- Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,α)78-Pt-201

[5] 80-Hg-204(n,g)80-Hg-205. La sección eficaz es

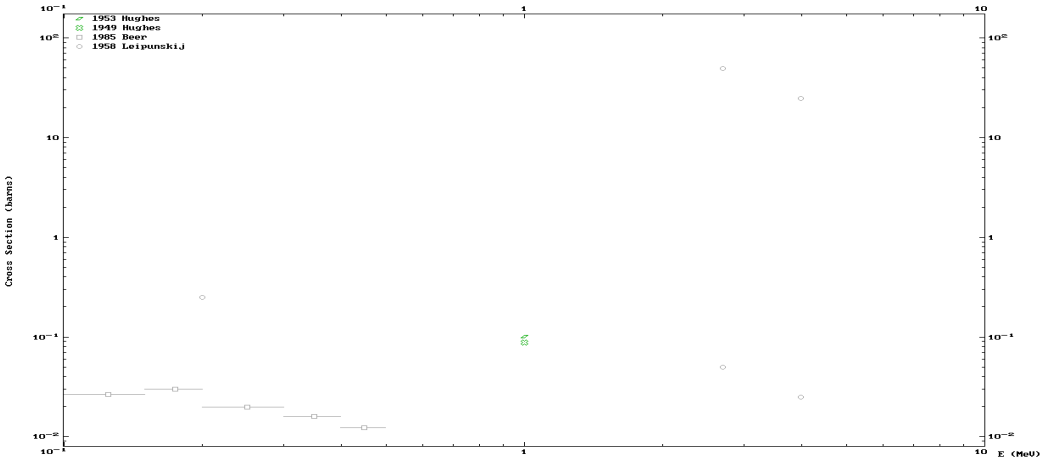


Figura 376. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,g)80-Hg-205

[6] 80-Hg-204(n,INL)80-Hg-204. La sección eficaz correspondiente es

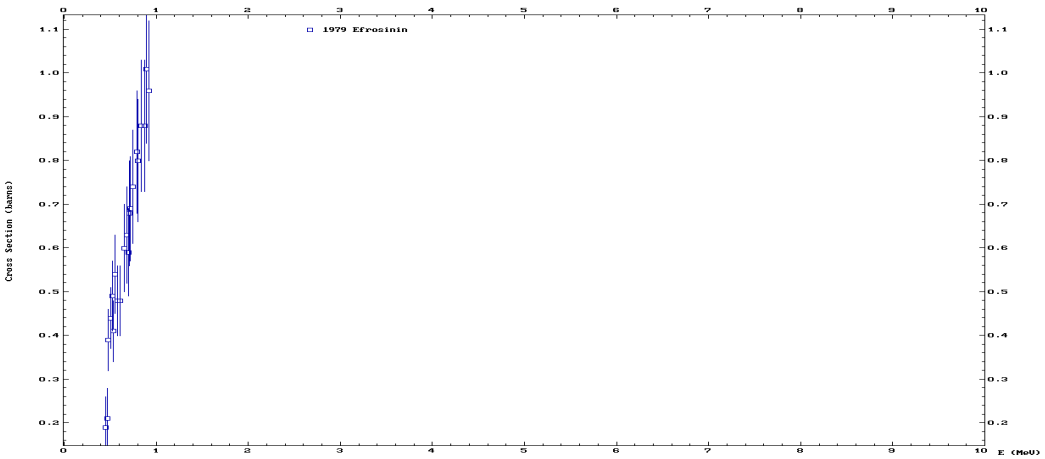


Figura 377. Sección eficaz de la reacción 80-Hg-204(n,INL)80-Hg-204

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 204Hg con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
80-Hg-204(n,2n)80-Hg-203	Superior a 7 MeV	Inferior a 0,5 Mev en el rango de la fuente	De interés

Tabla 155. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 204Hg con los neutrones.

5.11.6.1. Reacción 80-Hg-204(n,2n)80-Hg-203

El decaimiento del producto de esta reacción se lleva a cabo a través de:

Núcleo padre	Energía del padre (nivel)	Jn padre	$T_{1/2}$ padre	Modo de decaimiento	Valor GS-GS Q (keV)	Núcleo hijo
$^{203}_{80}Hg$	0.0	5/2-	46.594 d	β^-	492.1	$^{203}_{81}Tl$

Tabla 156. Características de decaimiento del 80Hg203.

En el decaimiento de este elemento se producen las emisiones siguientes:

- Emisión Beta-:

Energía (keV)	Energía punto final (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
57,87	212,9	100	0,0579
154,53	492,1	0,0015	2,3E-6

Tabla 157. Emisión β de decaimiento del 80Hg203.

- Emisión de electrones:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
Auger L	7,78	9,34	7,27E-4
Auger K	55,2	0,49	2,7E-4
CE K	193,6648	13,38	0,02590
CE L	263,8485	3,882	0,01024

Tabla 158. Emisión de electrones del 80Hg203.

- Emisión Gamma y X.:

Energía (keV)		Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
XR l	10,3	5,42	5,58E-4
XR kα2	70,832	3,69	0,0026
XR kα1	72,873	6,19	0,00451
XR kβ3	82,115	0,748	6,14E-4
XR kβ1	82,574	1,43	0,001182
XR kβ2	84,865	0,522	4,43E-4
	279,1952	81,5	0,22771

Tabla 159. Emisión Gamma y X. del 80Hg203

5.11.7. Conclusiones de las reacciones del Mercurio con los neutrones.

Las únicas reacciones interesantes del Mercurio son las que dan como productos 80Hg203, en cuyo decaimiento aparecen radiaciones γ con niveles de energía menores de la energía que producen los resultantes de la interacción de los neutrones con el flúor.

5.12. Estudio del Oxígeno.

Tiene los siguientes isótopos:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{15}O	0	15	1/2	122,2s	β^+,EC
^{16}O	99,759	15,9949	0	--	estable
^{17}O	0,037	16,9991	5/2	--	estable
^{18}O	0,204	17,9992	0	--	estable

Tabla 160. Isótopos del Oxígeno.

5.12.1. Reacciones del 16O con los neutrones.

[1] 8-O-16(N,2A)4-Be-9. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

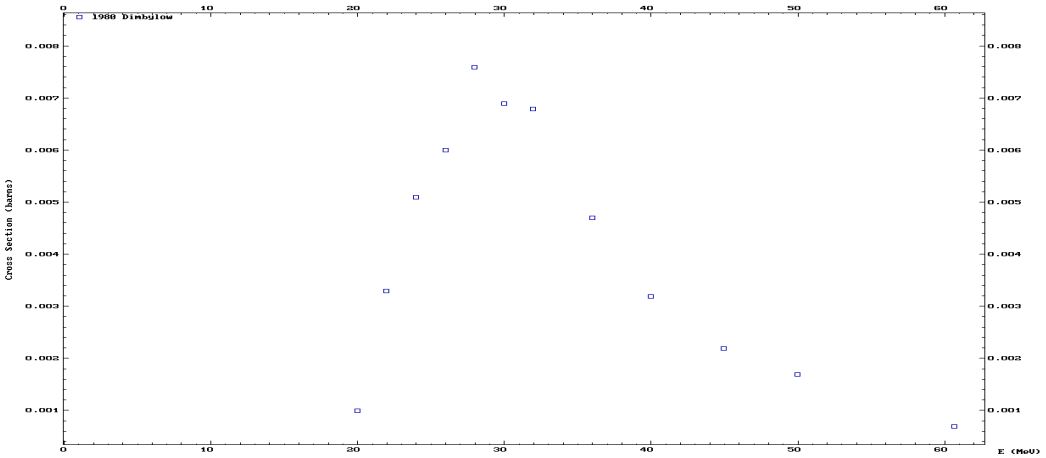


Figura 378. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,2A)4-Be-9

[2] 8-O-16(N,2ª+n)4-Be-8. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

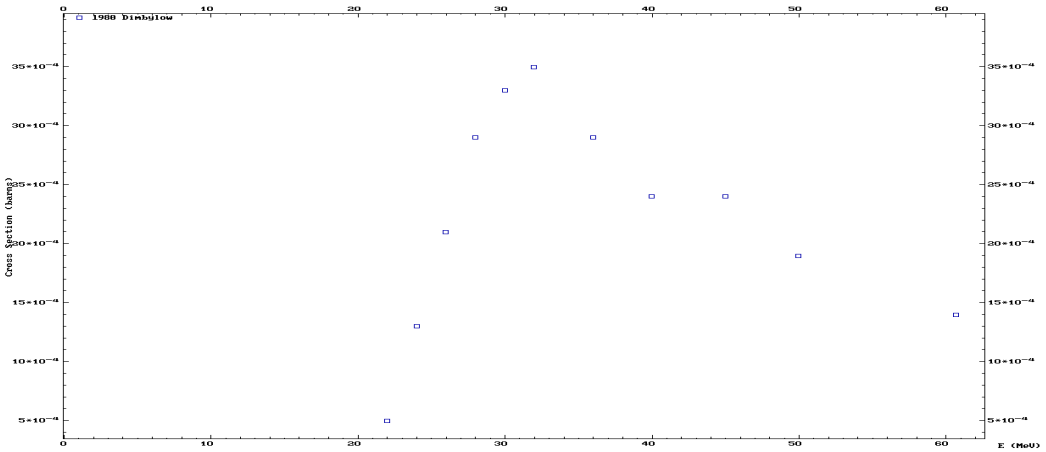


Figura 379. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,2ª+n)4-Be-8

[3] 8-O-16(N,2G)8-O-17. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

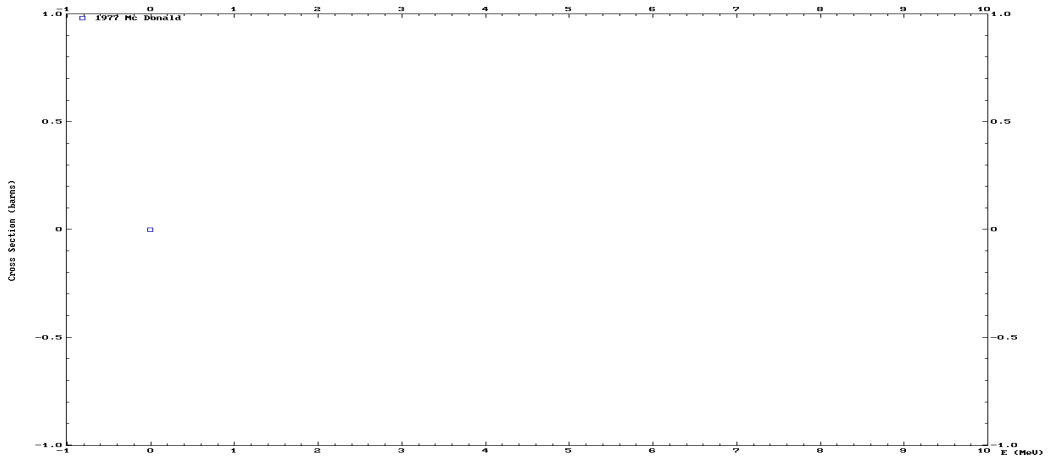


Figura 380. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,2G)8-O-17

[4] 8-O-16(n,2n)8-O-15. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

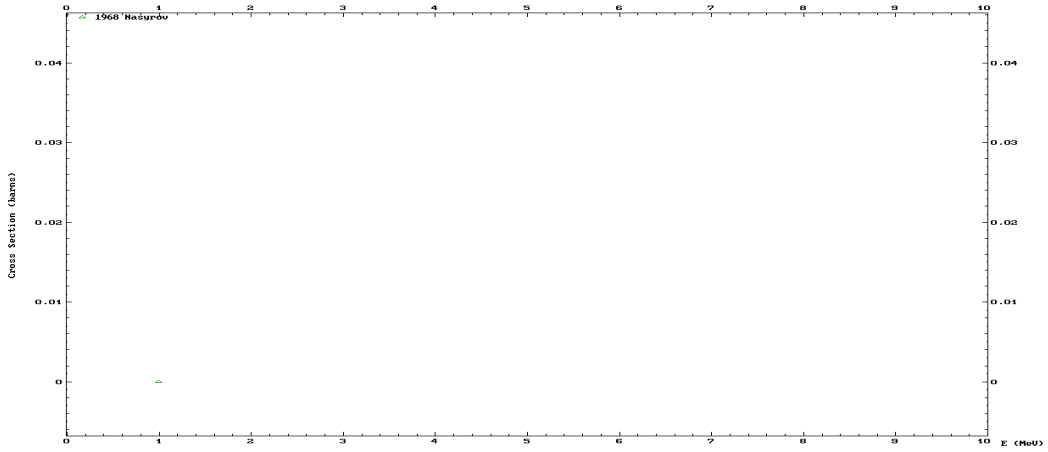


Figura 381. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,2n)8-O-15

[5] 8-O-16(n,2n+2P)6-C-13. Sus secciones eficaces son:

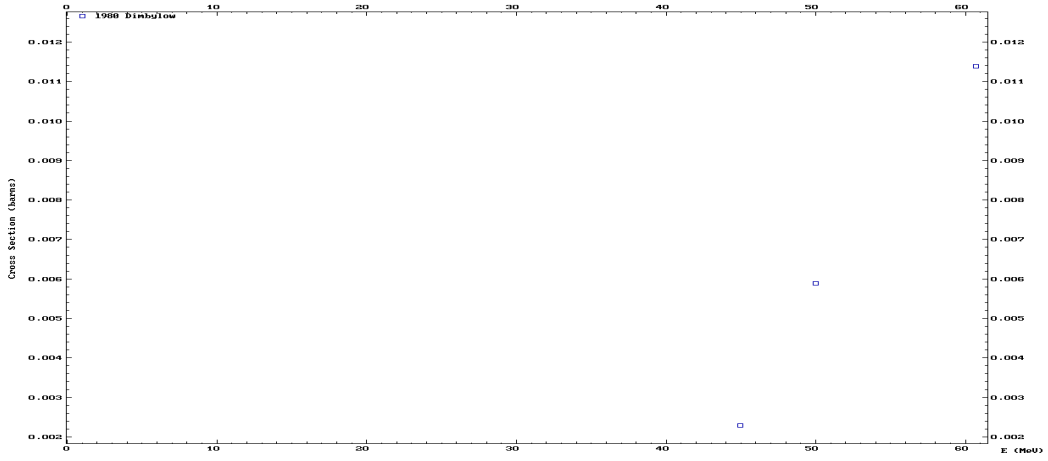


Figura 382. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,2n+2P)6-C-13

[6] 8-O-16(n,2n+α)6-C-11. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

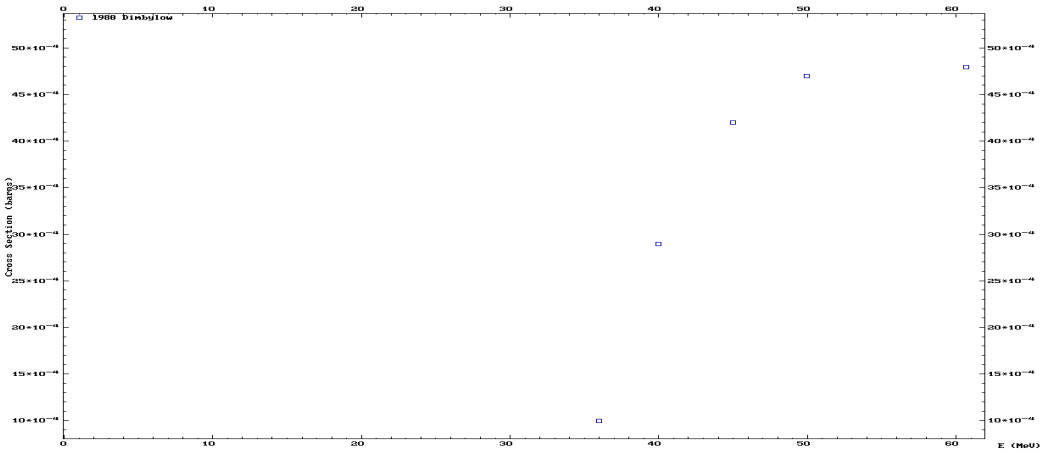


Figura 383. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,2n+α)6-C-11

[7] 8-O-16(n,2n+p)7-N-14. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

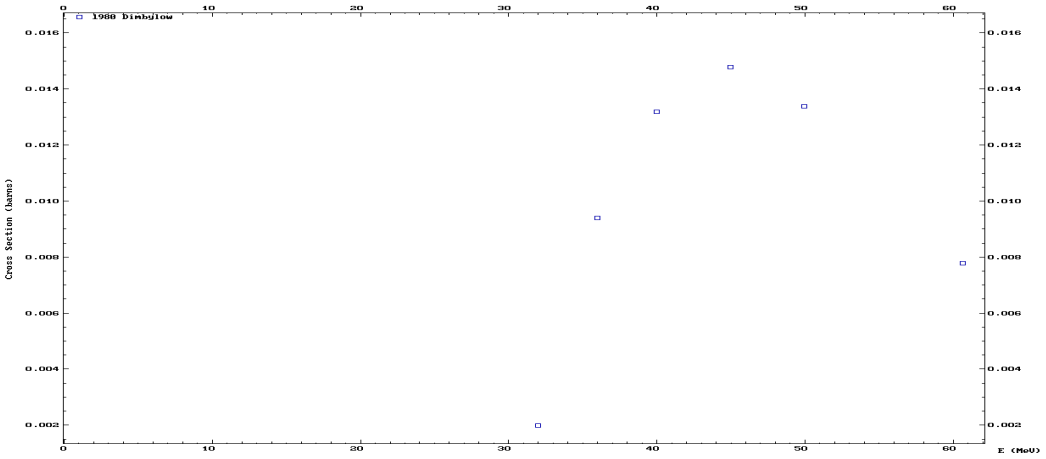


Figura 384. Sección eficaz de la reacción -O-16(n,2n+p)7-N-14

[8] 8-O-16(n,α)6-C-13. Con las siguientes secciones eficaces.

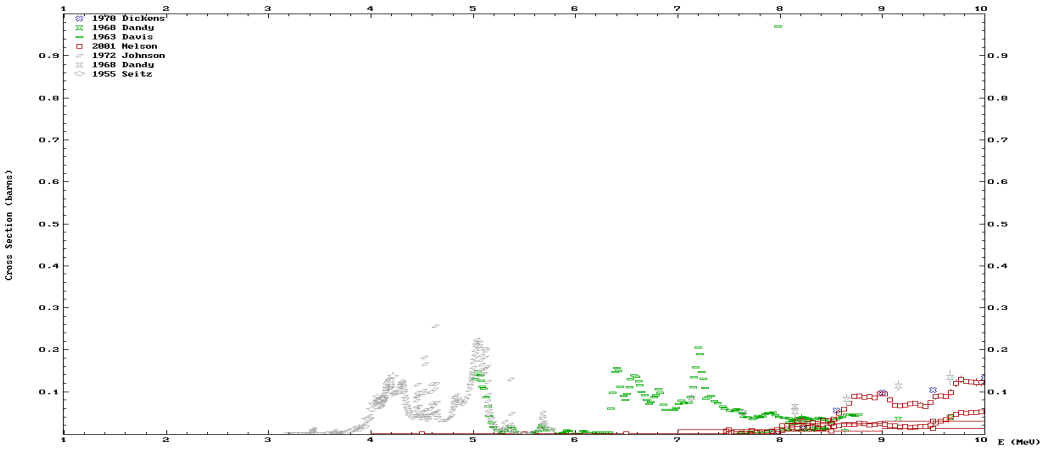


Figura 385. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α)6-C-13

[9] 8-O-16(n,α+2n)6-C-11. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

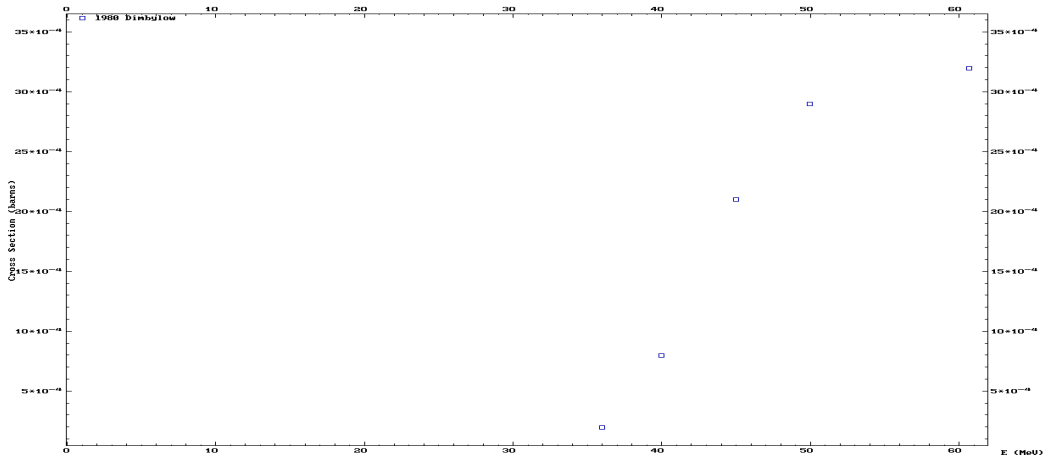


Figura 386. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+2n)6-C-11

[10] 8-O-16(n,α+n)6-C-12. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

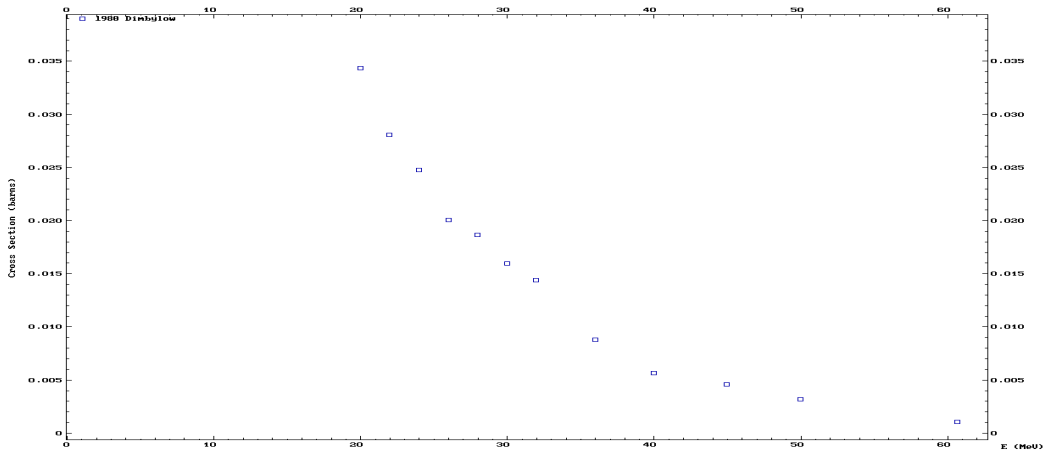


Figura 387. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+n)6-C-12

[11] 8-O-16(n,α+n+α)4-Be-8. La sección eficaz es

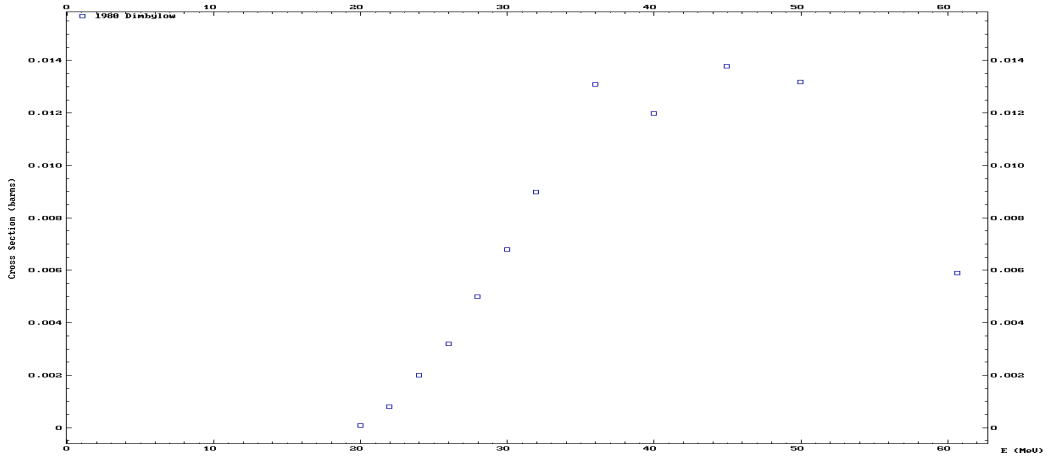


Figura 388. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+n+α)4-Be-8

[12] 8-O-16(n,α+n+p)5-B-11. La sección eficaz correspondiente es

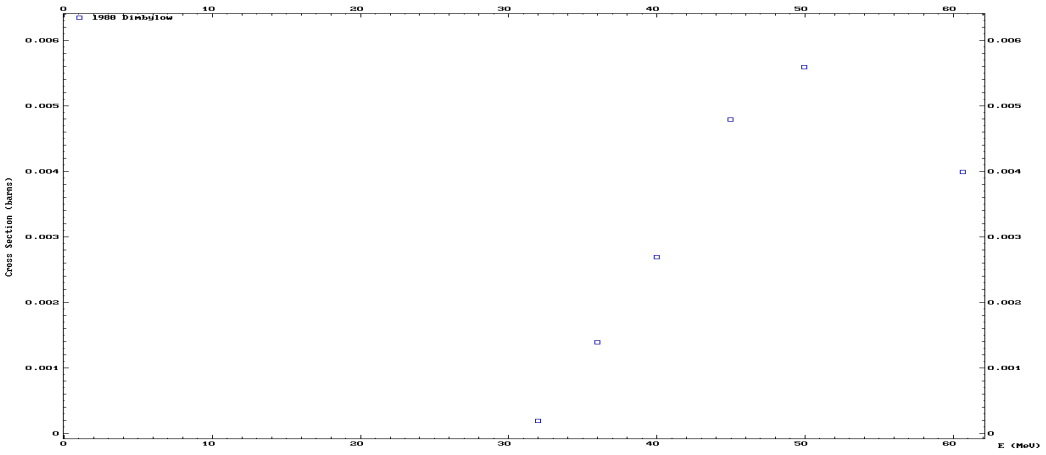


Figura 389. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,α+n+p)5-B-11

[13] 8-O-16(n,D)7-N-15. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

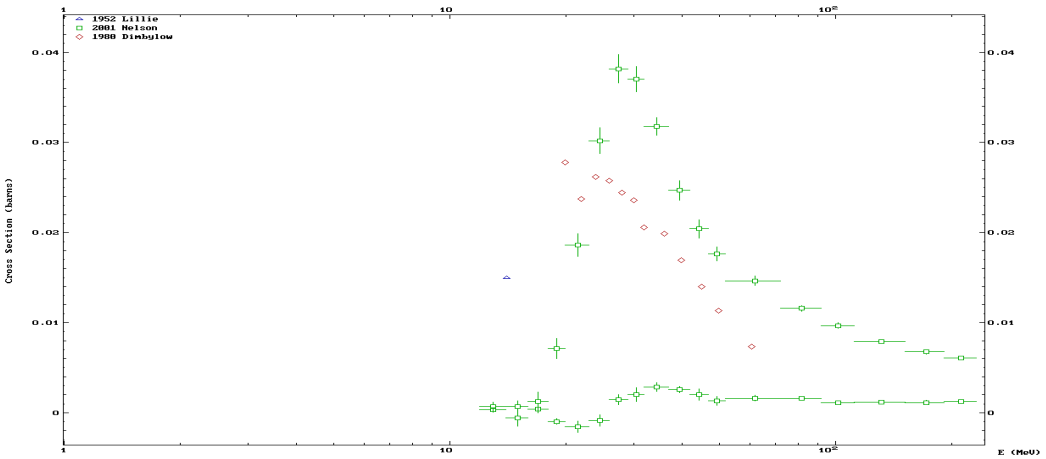


Figura 390. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D)7-N-15

[14] 8-O-16(n,D+α)5-B-11. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

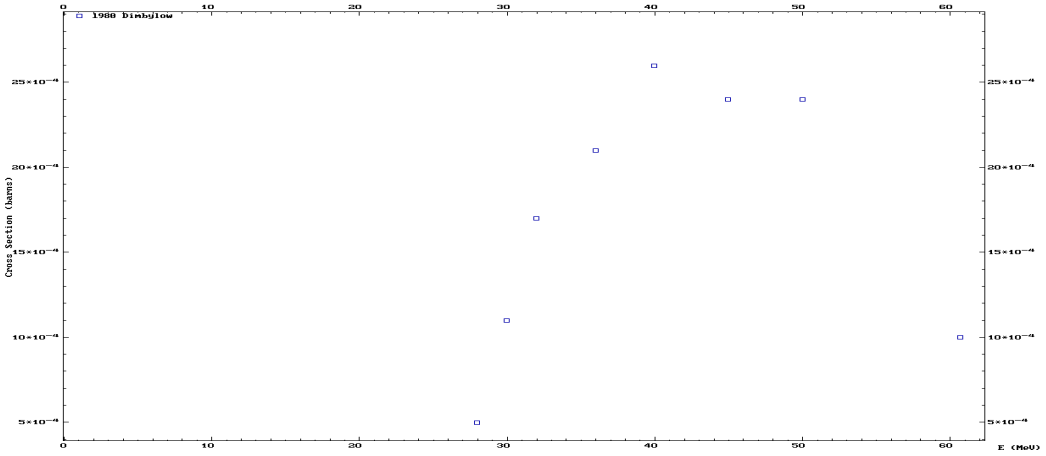


Figura 391. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+α)5-B-11

[15] 8-O-16(n,D+n)7-N-14. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

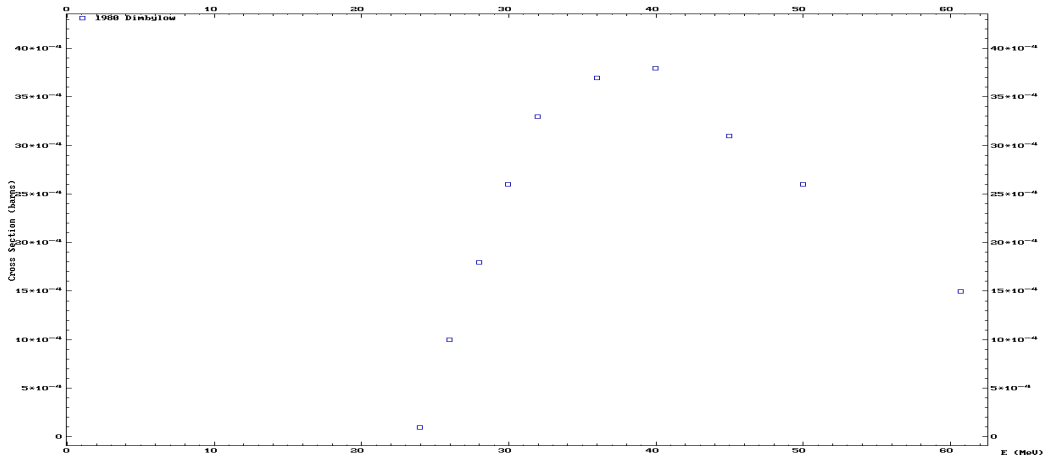


Figura 392. Sección eficaz de la reacción -O-16(n,D+n)7-N-14

[16] 8-O-16(n,D+n+p)6-C-13. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

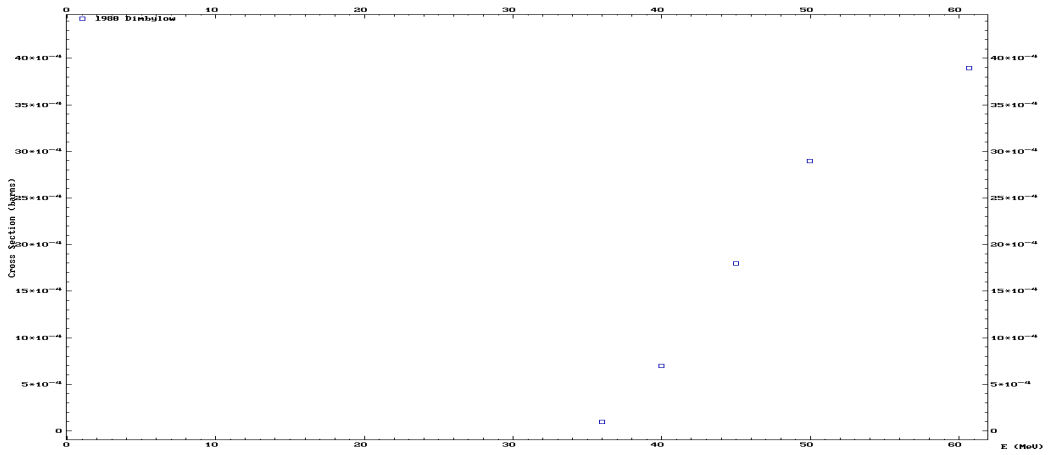


Figura 393. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+n+p)6-C-13

[17] 8-O-16(n,D+p)6-C-14. Sus secciones eficaces son:

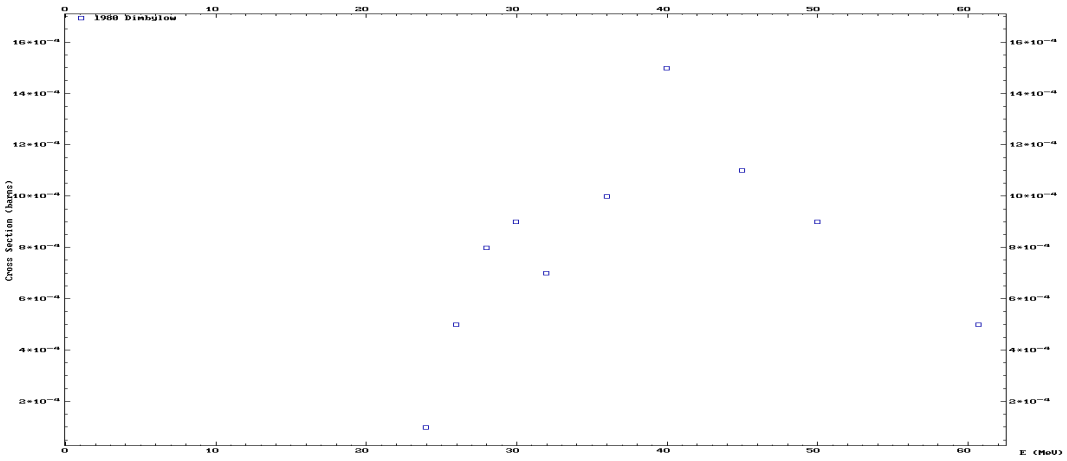


Figura 394. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+p)6-C-14

[18] 8-O-16(n,D+p+n)6-C-13. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

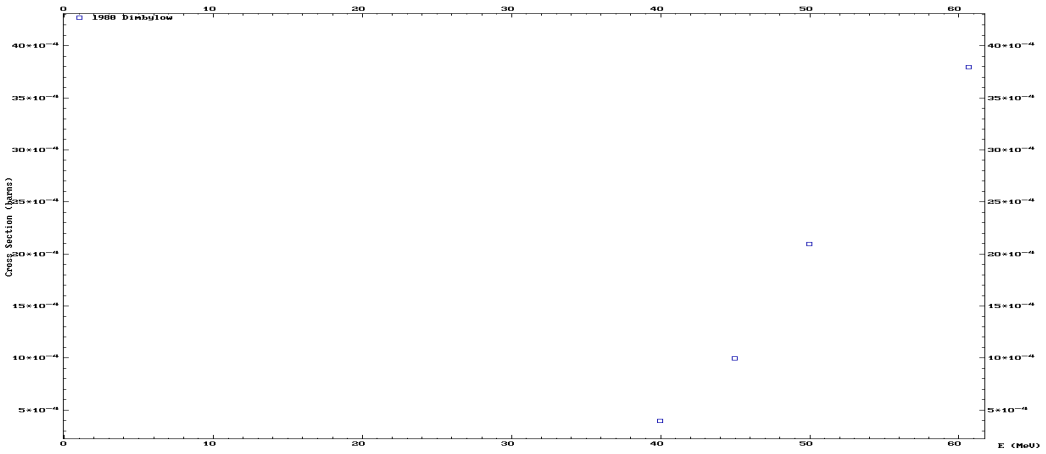


Figura 395. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,D+p+n)6-C-13

[19] 8-O-16(n,INL)8-O-16. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

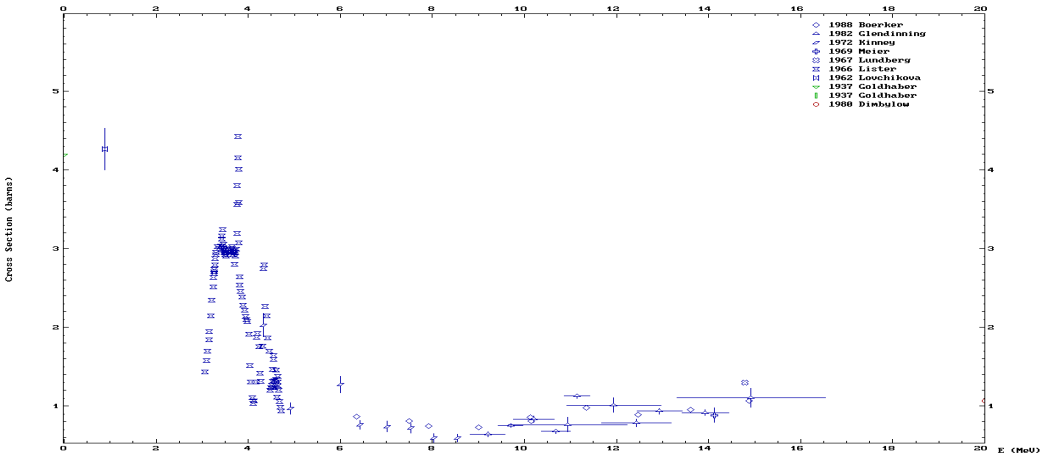


Figura 396. Sección eficaz de la reacción -O-16(n,INL)8-O-16

[20] 8-O-16(n,g)8-O-17. Con las siguientes secciones eficaces.

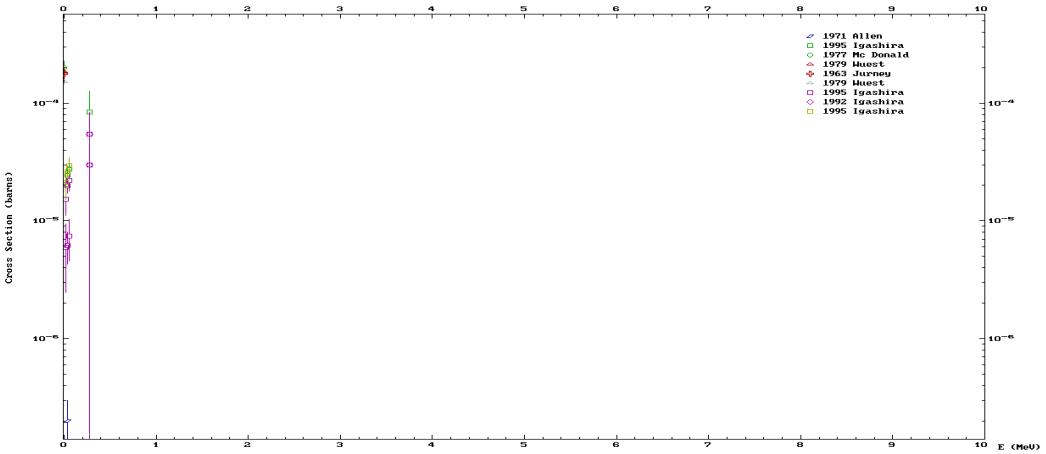


Figura 397. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,g)8-O-17

[21] 8-O-16(n,INL)8-O-16. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

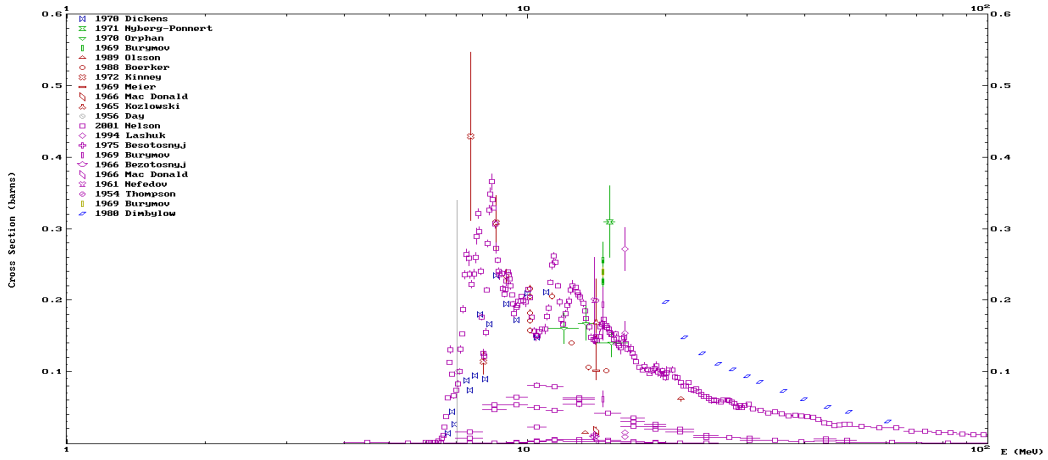


Figura 398. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,INL)8-O-16

[22] 8-O-16(n,n+2A)4-Be-8. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

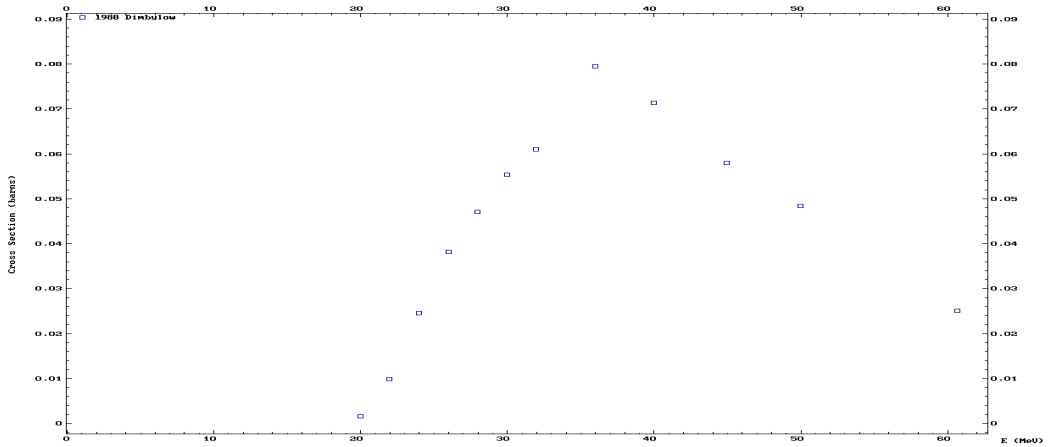


Figura 399. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+2A)4-Be-8

[23] 8-O-16(n,n+2P)6-C-14. La sección eficaz es

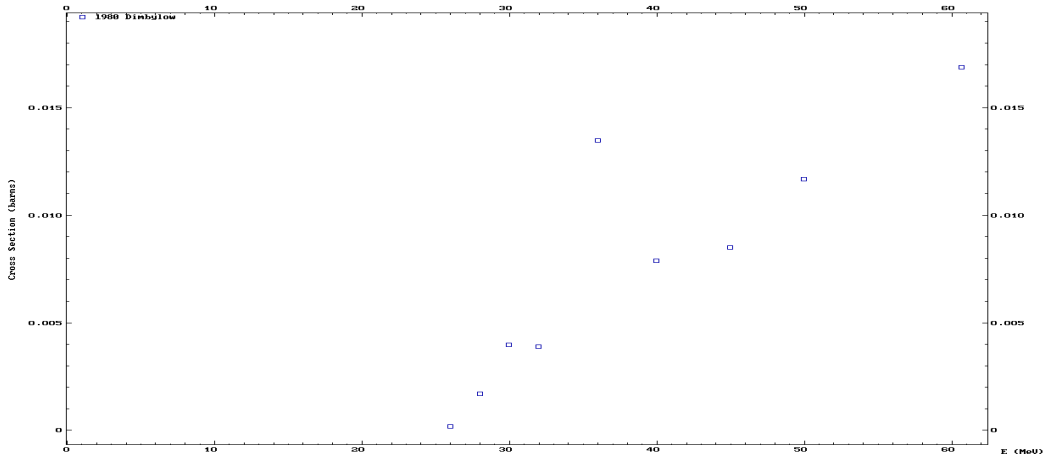


Figura 400. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+2P)6-C-14

[24] 8-O-16(n,n+α)6-C-12. La sección eficaz correspondiente es

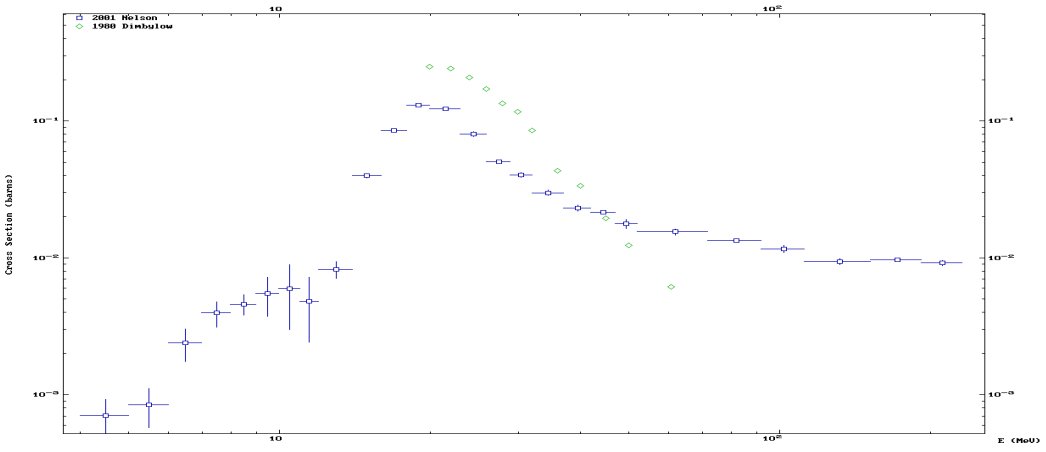


Figura 401. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+α)6-C-12

[25] 8-O-16(n,n+D)7-N-14. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

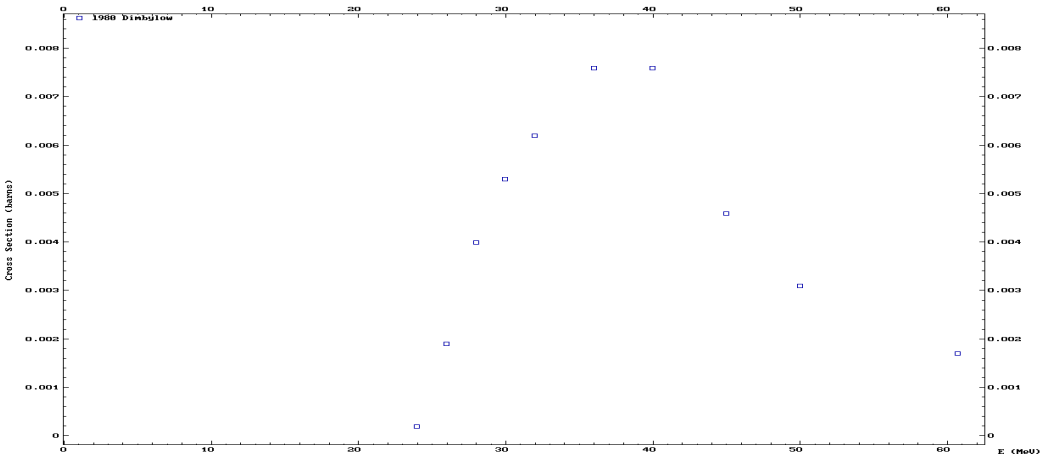


Figura 402. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+D)7-N-14

[26] 8-O-16(n,n+D+p)6-C-13. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

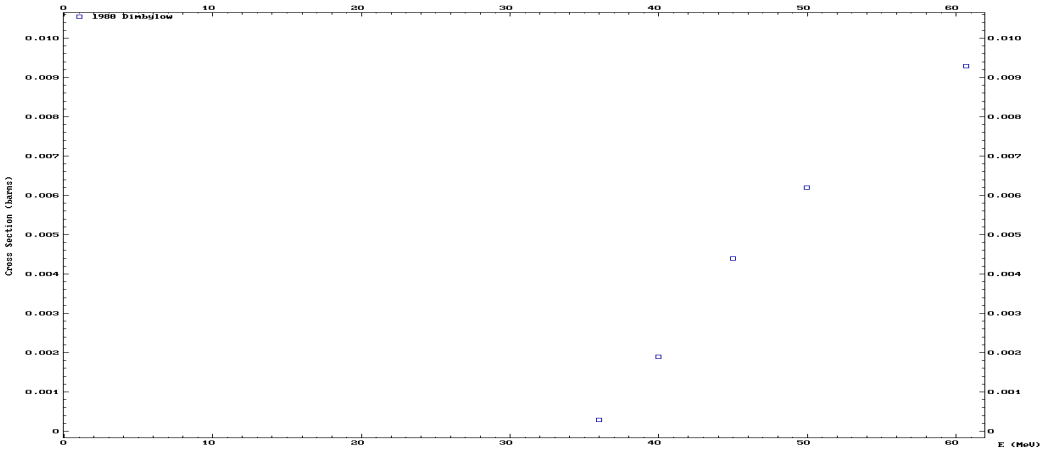


Figura 403. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+D+p)6-C-13

[27] 8-O-16(n,n+p)7-N-15. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

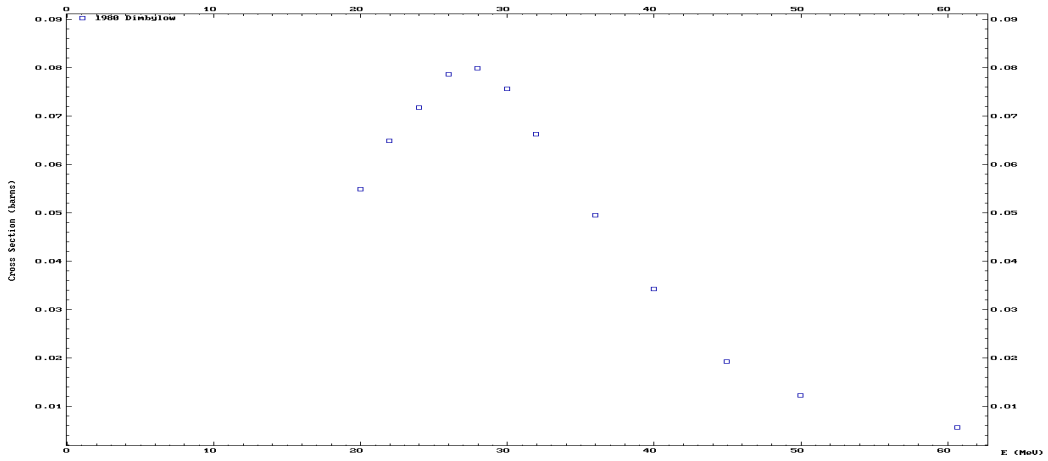


Figura 404. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p)7-N-15

[28] 8-O-16(n,n+p+α)5-B-11. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

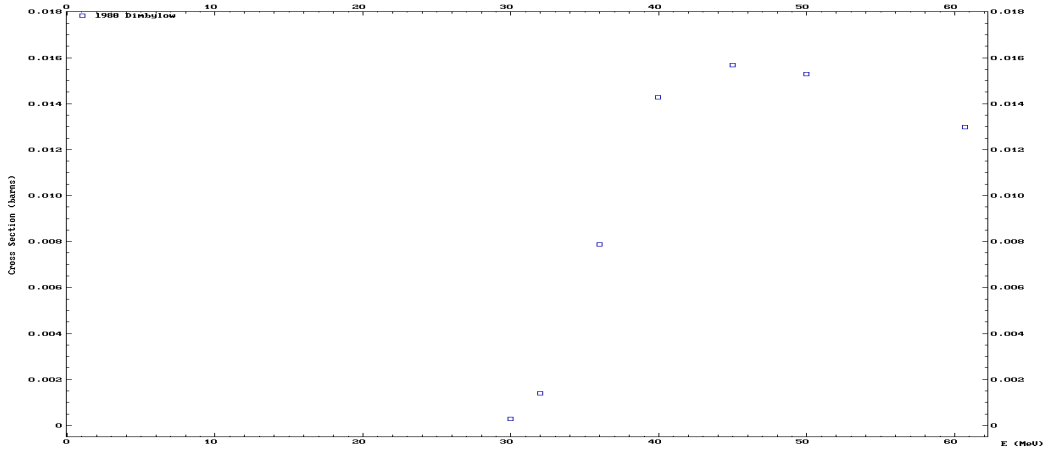


Figura 405. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p+α)5-B-11

[29] 8-O-16(n,n+p+n)7-N-14. Sus secciones eficaces son:

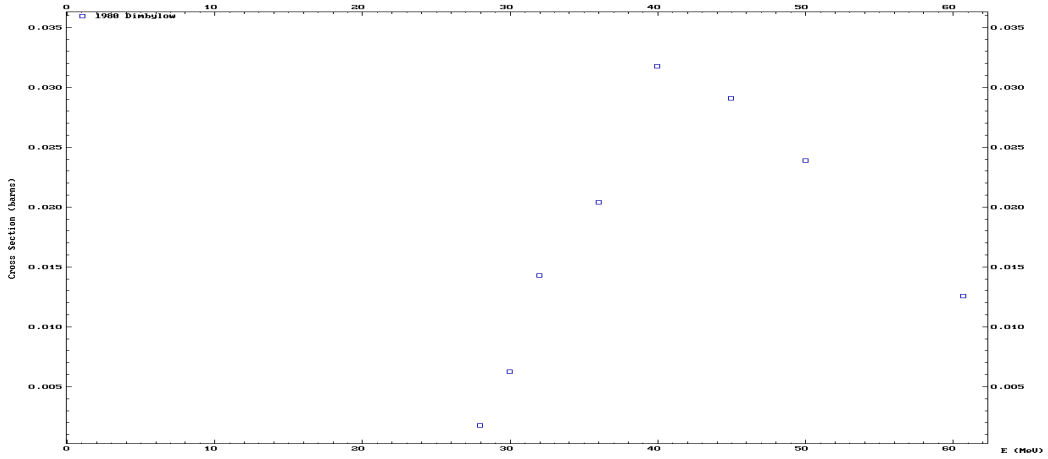


Figura 406. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p+n)7-N-14

[30] 8-O-16(n,n+p+X)6-C-13. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

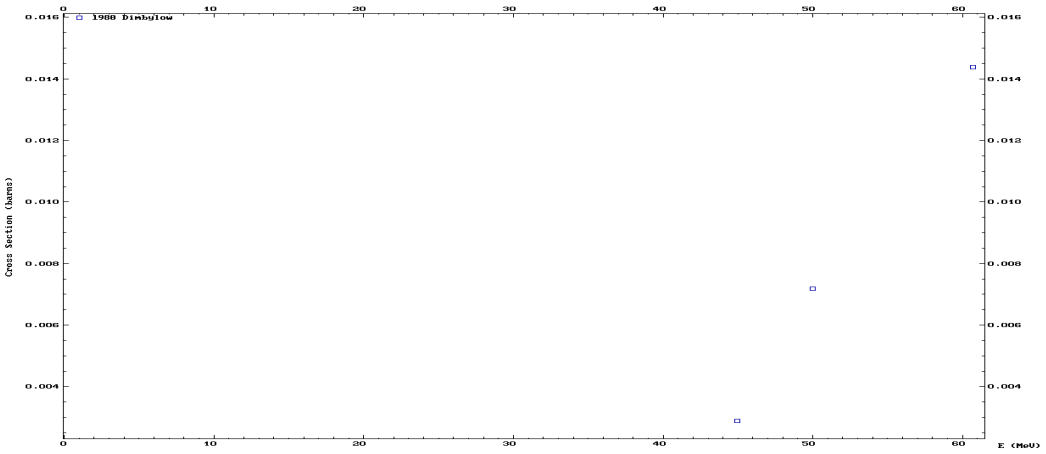


Figura 407. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,n+p+X)6-C-13

[31] 8-O-16(n,non). En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

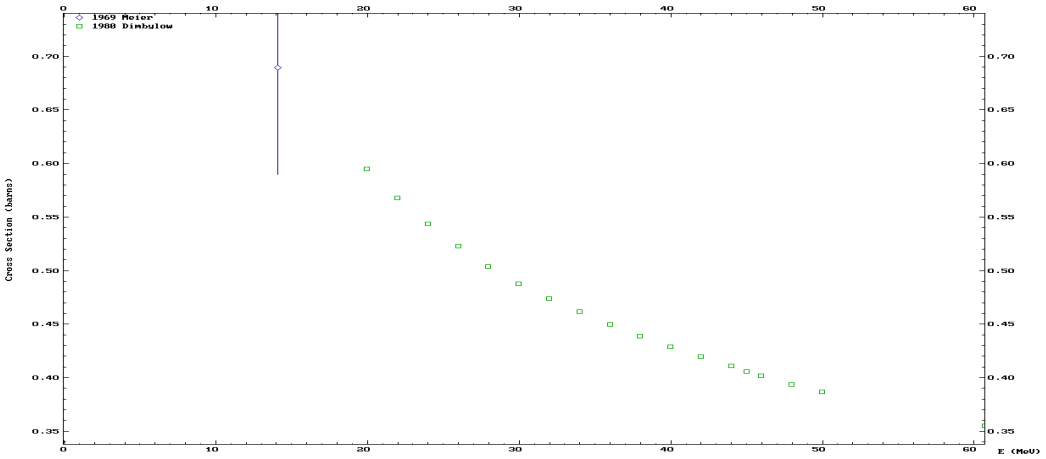


Figura 408. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,non)

[32] 8-O-16(n,p)7-N-16. Con las siguientes secciones eficaces.

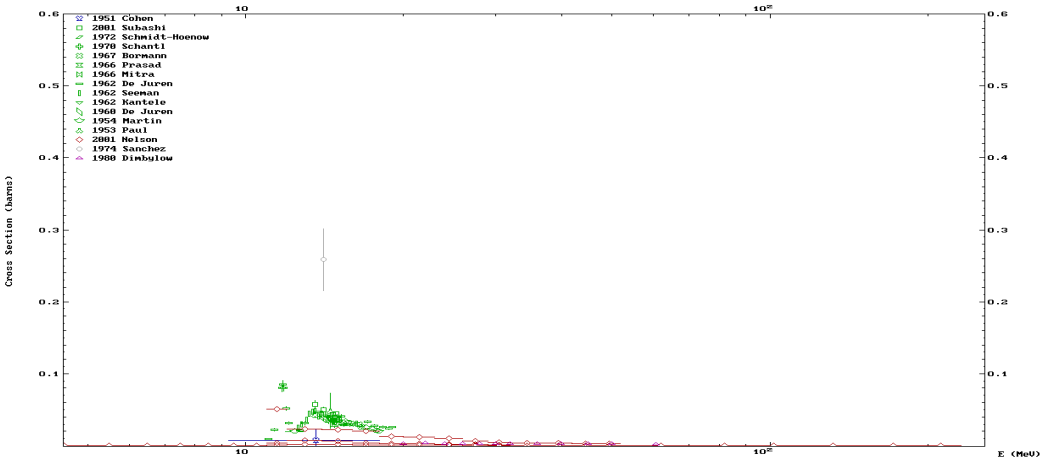


Figura 409. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p)7-N-16

[33] 8-O-16(n,p+2n)7-N-14. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

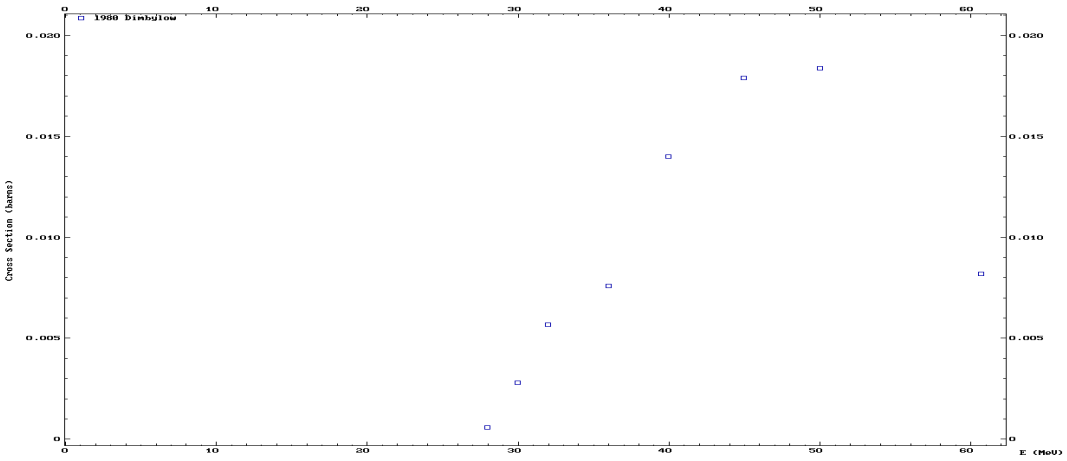


Figura 410. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+2n)7-N-14

[34] 8-O-16(n,p+2n+p)6-C-13. Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

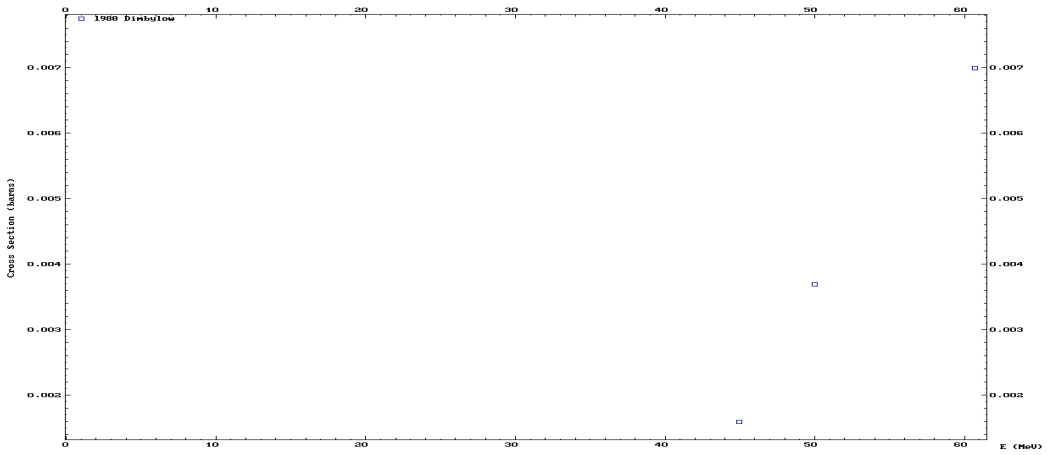


Figura 411. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+2n+p)6-C-13

[35] 8-O-16(n,p+α)5-B-12. La sección eficaz es

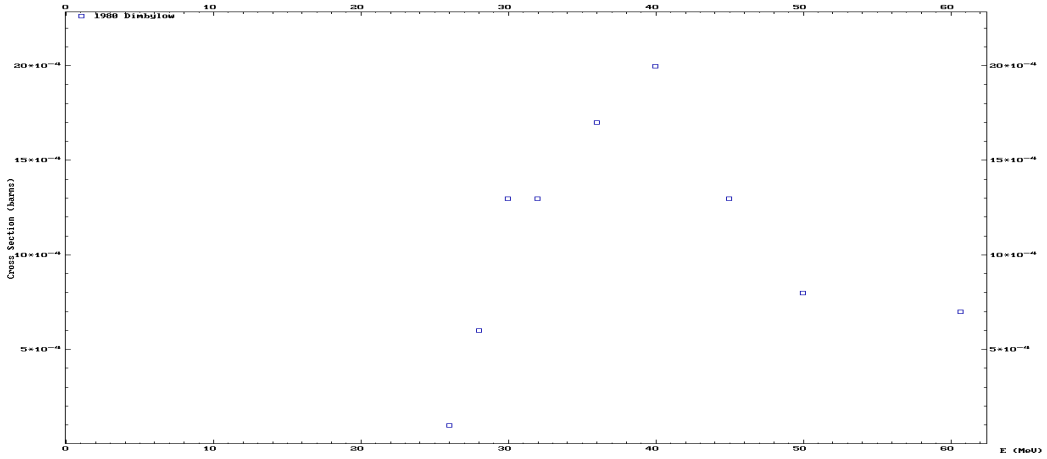


Figura 412. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+α)5-B-12

[36] 8-O-16(n,p+α+n)5-B-11. La sección eficaz correspondiente es

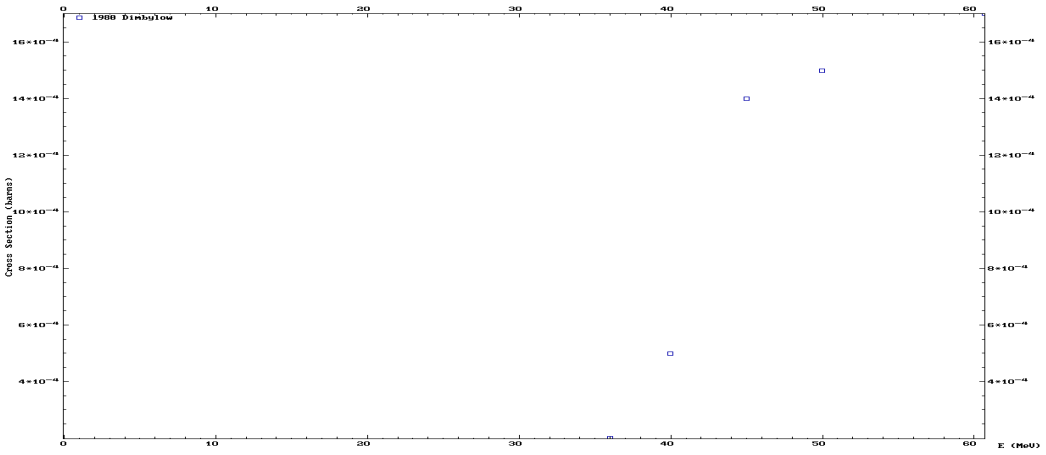


Figura 413. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+α+n)5-B-11

[37] 8-O-16(n,p+D)6-C-14. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

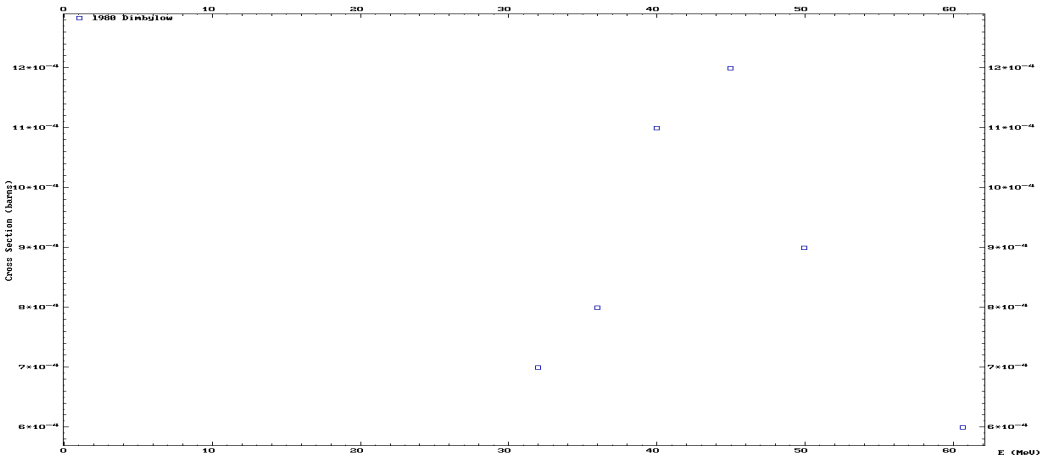


Figura 414. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+D)6-C-14

[38] 8-O-16(n,p+D+n)6-C-13. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

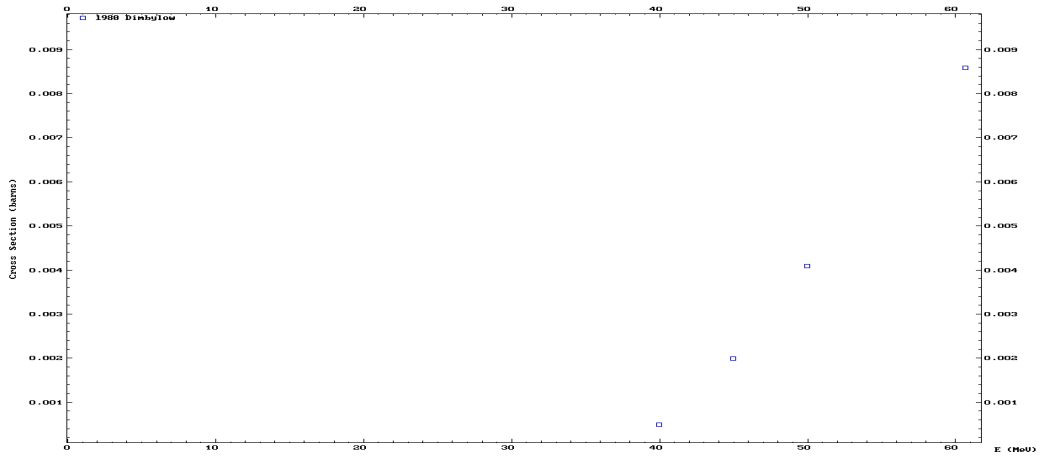


Figura 415. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+D+n)6-C-13

[39] 8-O-16(n,p+n)7-N-15. Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

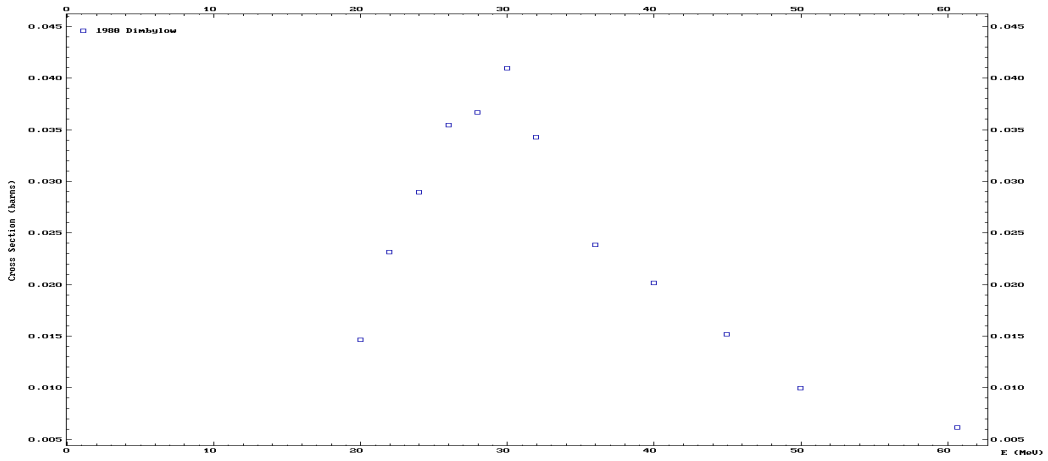


Figura 416. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+n)7-N-15

[40] 8-O-16(n,p+n+α)5-B-11. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente:

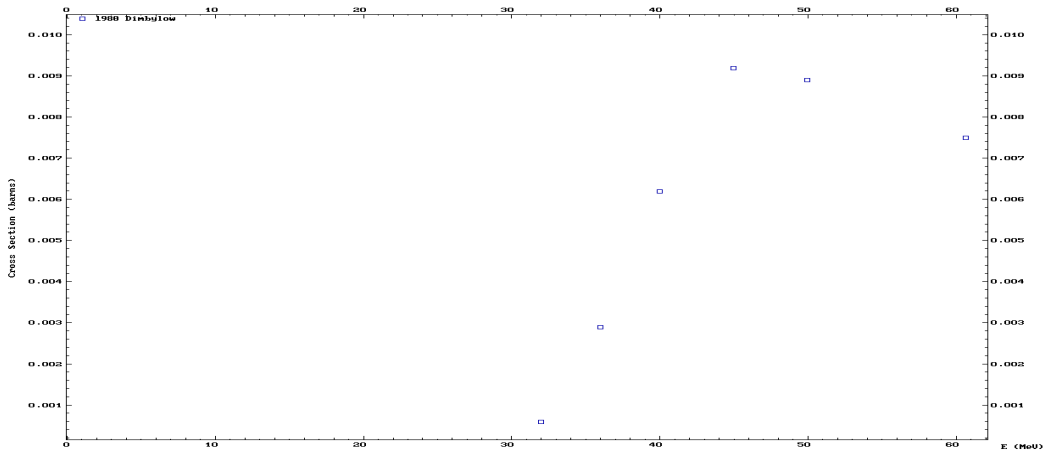


Figura 417. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+n+α)5-B-11

[41] 8-O-16(n,p+n+p)6-C-14. Sus secciones eficaces son:

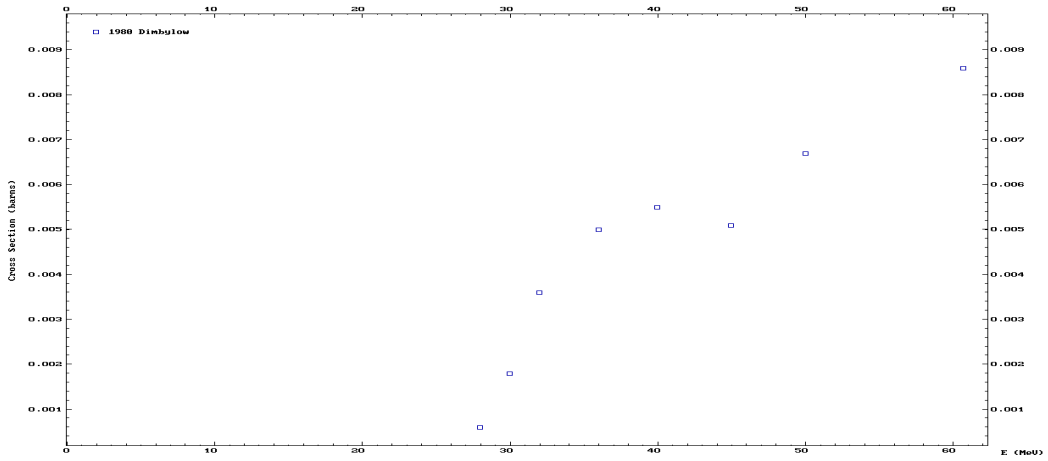


Figura 418. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,p+n+p)6-C-14

[42] 8-O-16(n,T)7-N-14. Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

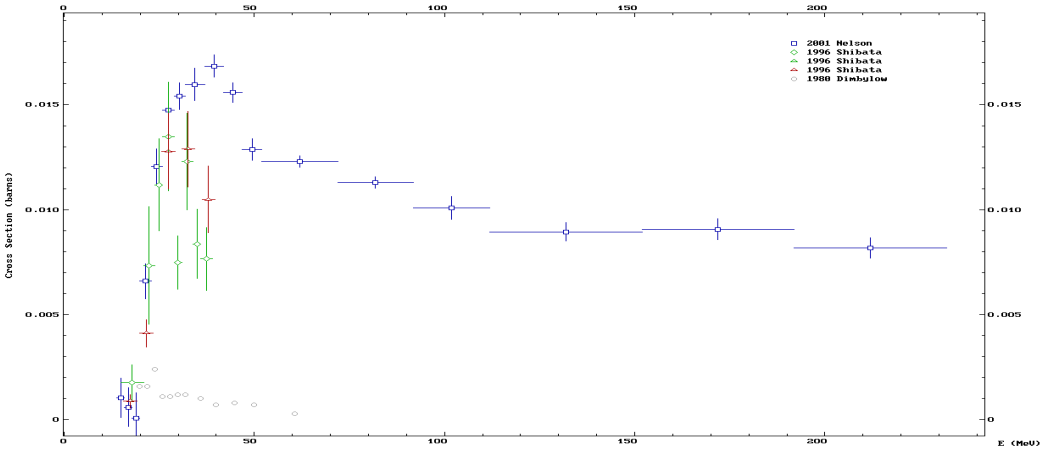


Figura 419. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,T)7-N-14

[43] 8-O-16(n,T+n)7-N-13. En la gráfica siguiente se muestran sus secciones eficaces:

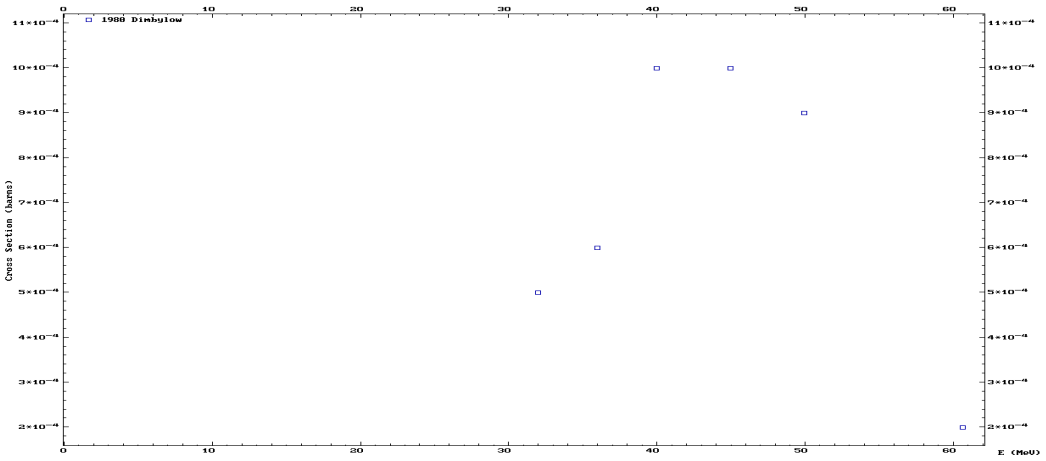


Figura 420. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,T+n)7-N-13

[44] 8-O-16(n,T+p)6-C-13. Con las siguientes secciones eficaces.

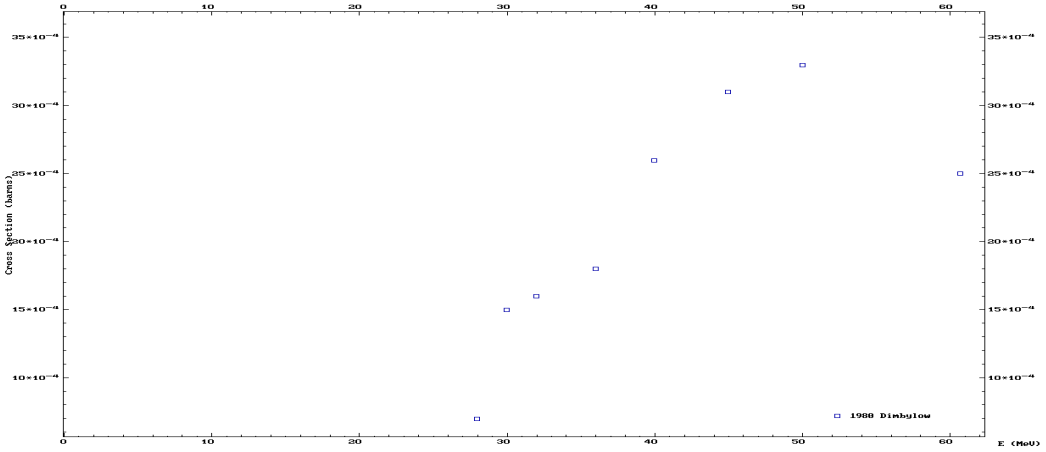


Figura 421. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,T+p)6-C-13

[45] 8-O-16(n,THS)8-O-16. Esta reacción tiene las siguientes secciones eficaces

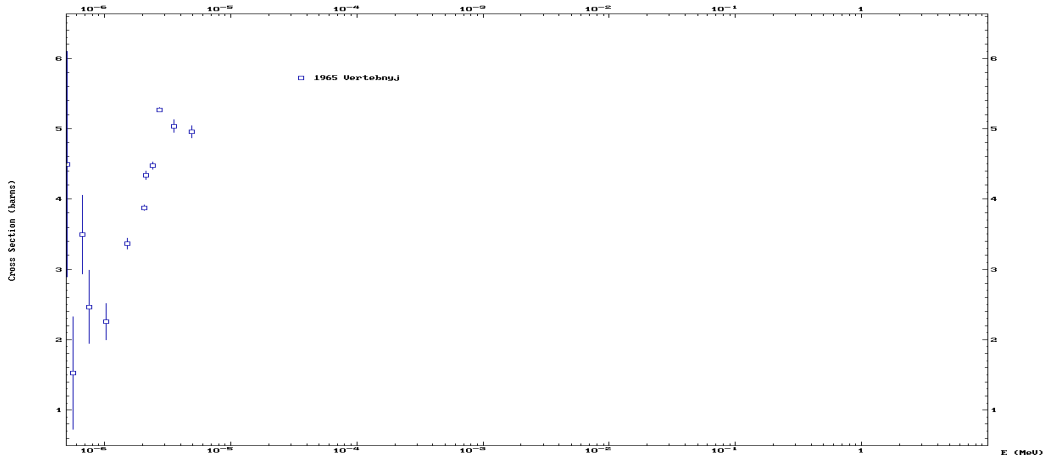


Figura 422. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,THS)8-O-16

[46] 8-O-16(n,TOT). Cuyas secciones eficaces se muestran a continuación:

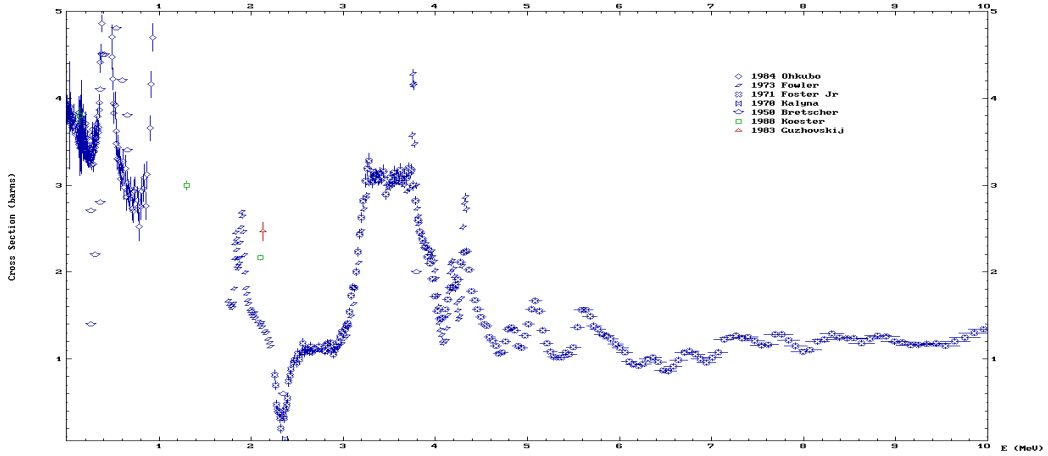


Figura 423. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(n,TOT)

[47] 8-O-16(N,X)0-G-0.

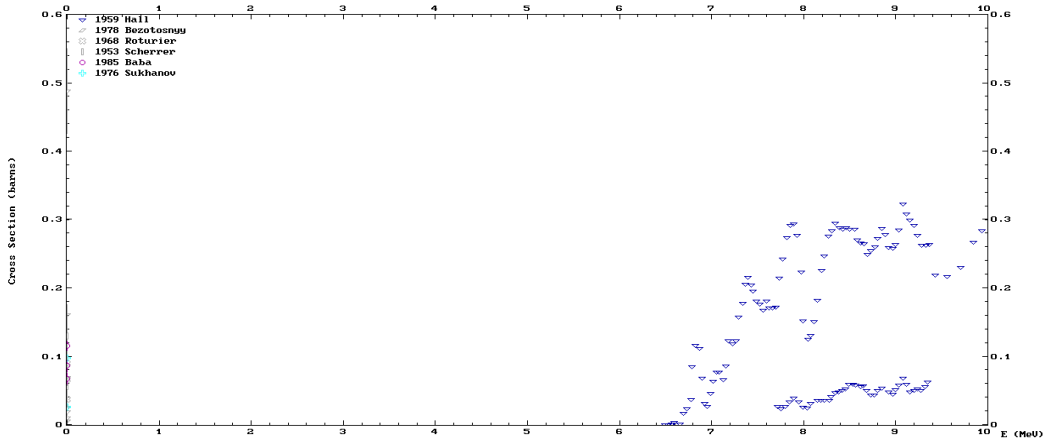


Figura 424. Sección eficaz de la reacción 8-O-16(N,X)0-G-0

En resumen, las secciones eficaces de las posibles reacciones del 16O con los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio son:

Reacción	Rango de energías de activación	Rango de σ	Comentarios
8-O-16(n,α)6-C-13	Mayor que 3 MeV	Menor que 0,2 Barns	De interés

Tabla 161. Resumen de las secciones eficaces de las posibles reacciones del 16O con los neutrones.

5.12.1.1. Reacción 8-O-16(n,α)6-C-13.

El producto de la reacción, el carbono 13 es estable, por lo que no interfiere en la lectura.

5.12.2. Conclusiones de las reacciones del Oxígeno con los neutrones.

La única reacción con una sección eficaz significativa para la energía de los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio, es la que se presenta en el punto anterior, que produce 6C13 que es un elemento estable. La reacción del tipo n,α se estudió detenidamente en el punto 5.2.3.

5.13. Estudio del hidrógeno.

Los isótopos del Hidrógeno son:

Nuclido	Abundancia [%]	Masa	Espín	Vida media	Decaimiento
^{1}H	99,984	1,0078	1/2	--	estable
^{2}H	0,0156	2,0141	1	--	estable
^{3}H	0	3,016	1/2	12,3y	β^-

Tabla 162. Isótopos del Hidrógeno.

5.13.1. Reacciones del 1H con los neutrones.

[1] 1-H-1(N,2G)1-H-2. La sección eficaz es

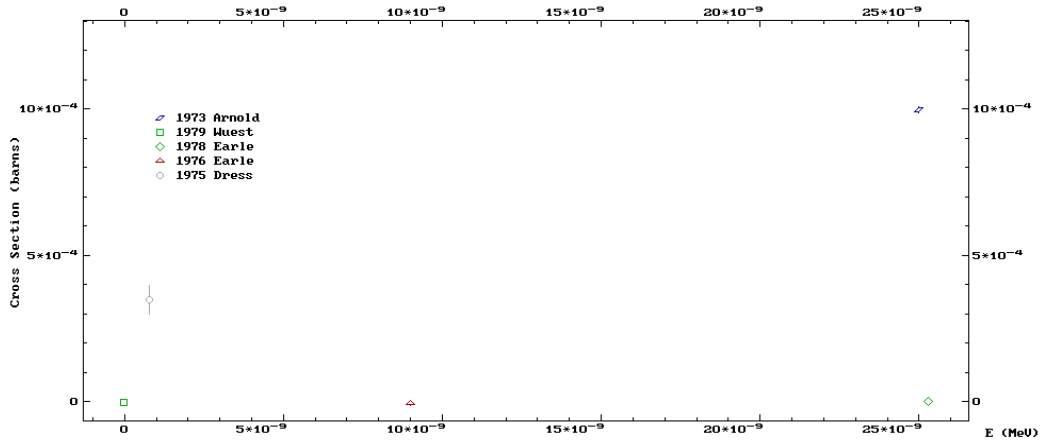


Figura 425. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(N,2G)1-H-2

[2] 1-H-1(n,αBS),, La sección eficaz correspondiente es

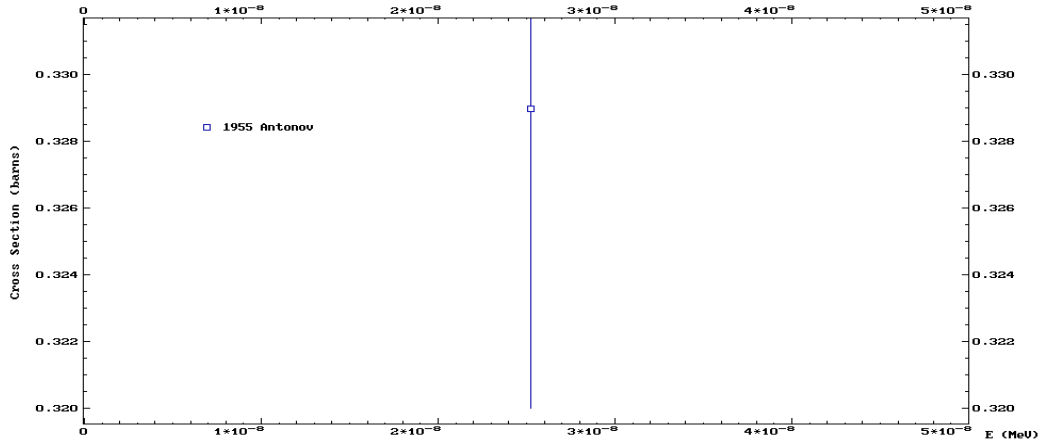


Figura 426. Sección eficaz de la reacción -H-1(n,ABS)

[3] 1-H-1(n,EL)1-H-1. Que tiene la sección eficaz que se muestra a continuación:

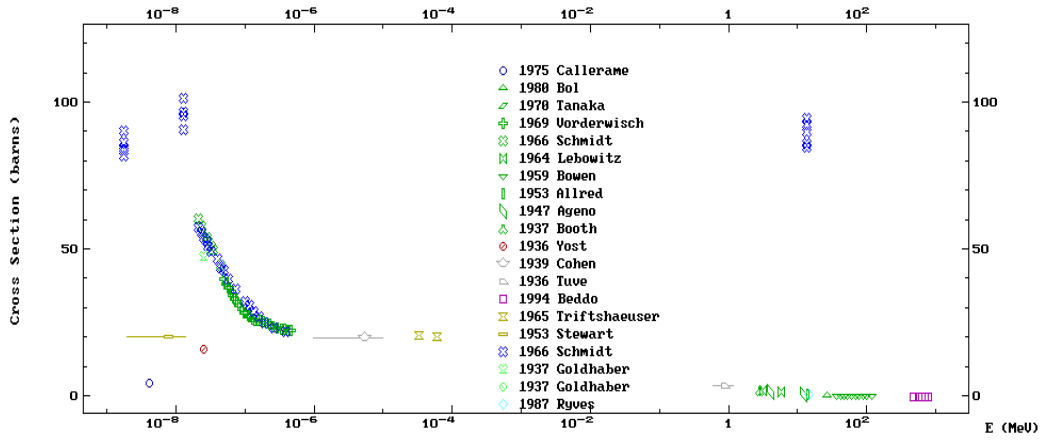


Figura 427. Sección eficaz de la reacción -H-1(n,EL)1-H-1

Vamos a hacer un zoom sobre la zona de emisión de la fuente de neutrones:

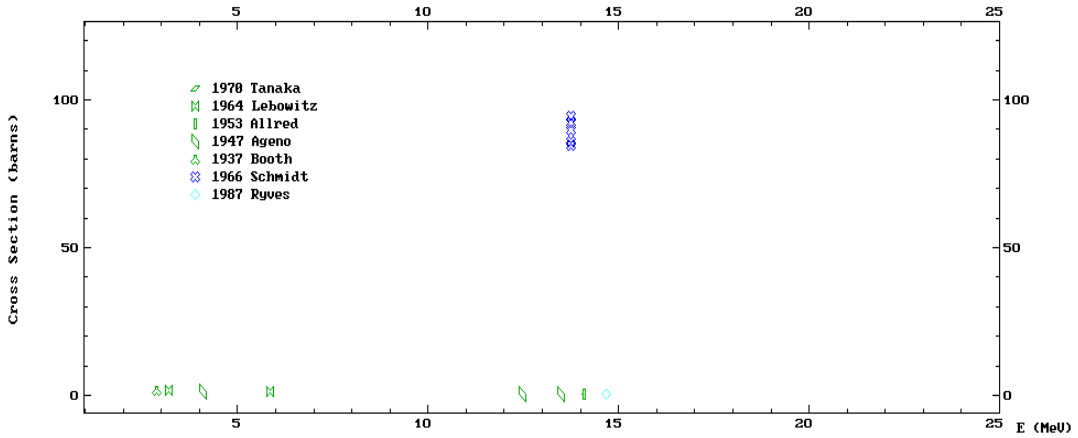


Figura 428. Sección eficaz de la reacción -H-1(n,EL)1-H-1 en la zona de emisión de la fuente

[4] 1-H-1(n,g)1-H-2. En el siguiente gráfico se observan sus secciones eficaces:

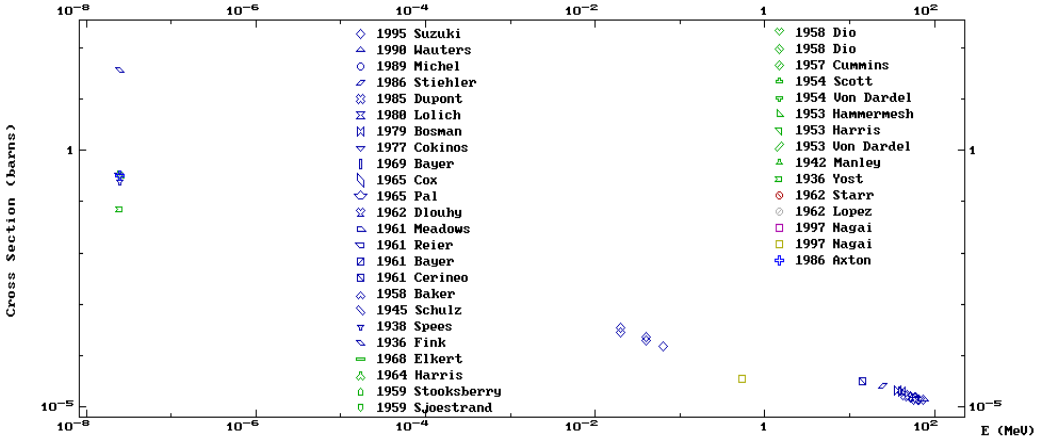


Figura 429. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,g)1-H-2

[5] 1-H-1(n,INL)1-H-1, Con las secciones eficaces que se observan a continuación:

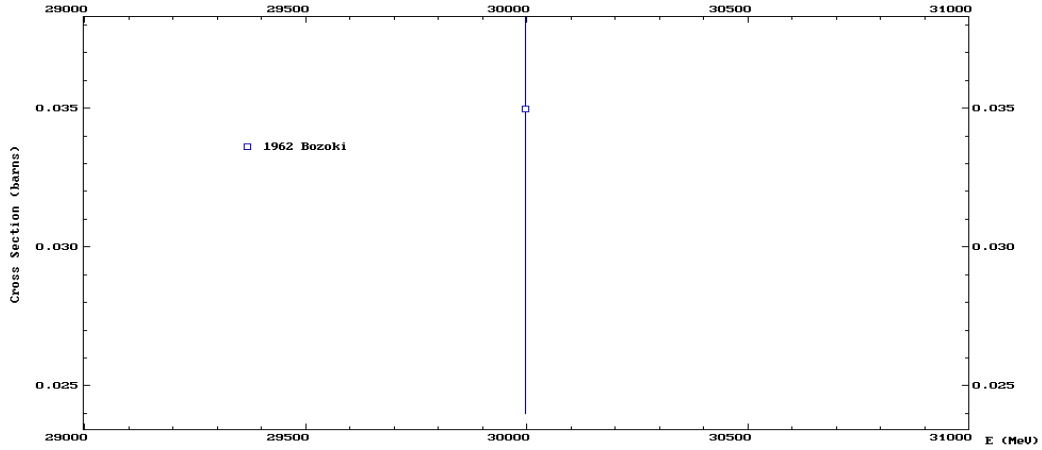


Figura 430. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,INL)1-H-1

[6] 1-H-1(n,THS)1-H-1. Las secciones eficaces de esta reacción se representan en la figura siguiente: Sus secciones eficaces son:

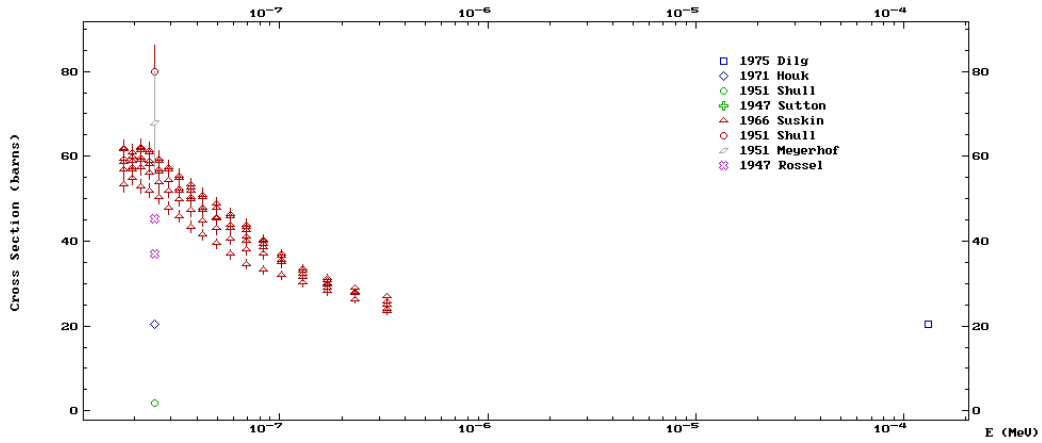


Figura 431. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,THS)1-H-1

[7] 1-H-1(n,TOT),, Que tiene las secciones eficaces que se observan en la figura:

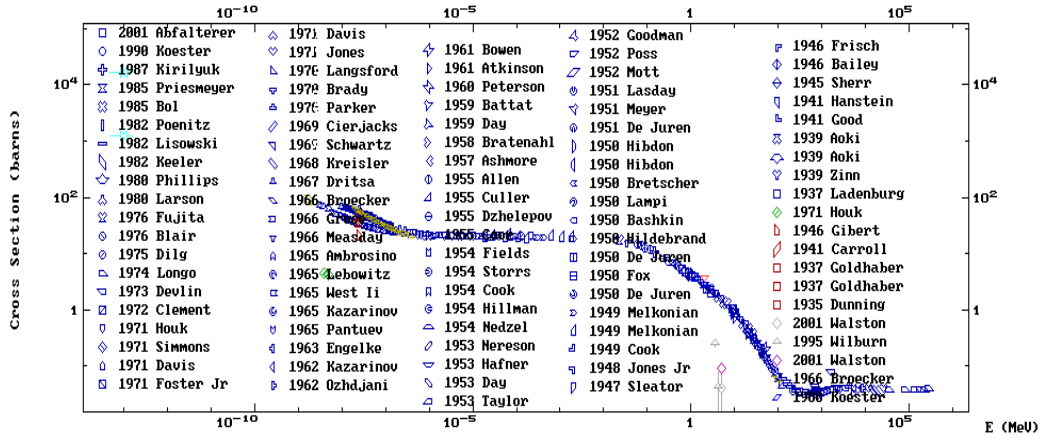


Figura 432. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,TOT)

que sobre la zona de emision de la fuente de americio berilio es:

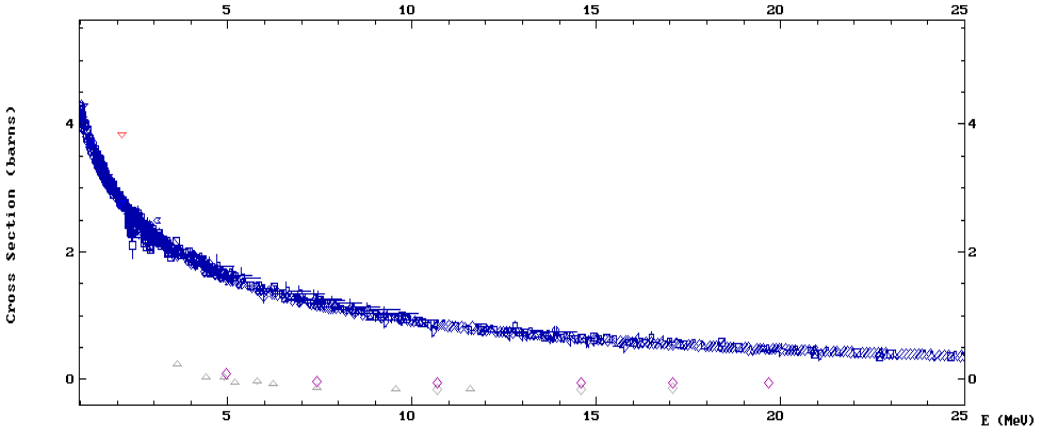


Figura 433. Sección eficaz de la reacción 1-H-1(n,TOT) en el intervalo de emisión de la fuente.

En resumen, no se encuentra ninguna reacción con una sección eficaz significativa entre el 1H y los neutrones procedentes de una fuente de Americio Berilio.

5.13.2. Conclusiones de las reacciones del Hidrógeno con los neutrones.

No hay reacciones de interés entre el Hidrógeno y los neutrones que interfieran en la señal.

5.14. Conclusiones de las reacciones de los elementos de la fluorita con los neutrones.

Con el fin de analizar las emisiones teóricas tras la irradiación con neutrones provenientes de una fuente de Americio Berilio, en un análisis del tipo DGNAA, (es decir, con lecturas de la radiación gamma emitida posteriormente a la activación), se ha realizado el siguiente plan de estudio:

- Se han distinguido los distintos elementos que se pueden encontrar en la muestra. De ellos se han resaltado 12 elementos.
- Se han analizado las reacciones de los elementos con los neutrones, y se ha estudiado el decaimiento de productos de estas reacciones. Hay 39 posibles tipos de reacciones para cada elemento, por lo que se han estudiado 468 posibles reacciones. De estas no todas son viables por lo que:
- De las 468 reacciones posibles se han seleccionado y analizado 304 reacciones en total de las que haya información, haciendo especial énfasis en las reacciones con los neutrones de una energía entre 3 y 10 MeV, que son los característicos de una fuente de americio Berilio.
- De esta fase se han identificado y analizado el decaimiento de 29 productos radiactivos que se originan en las reacciones, y de ellos se ha extraído información acerca de la energía de rayos causados en su decaimiento y el tiempo de decaimiento.

De este proceso minucioso, se extraen las siguientes conclusiones (Tabla 163):

- En el rango de energías de los productos de decaimiento, destaca, por su elevado valor, la energía de rayos gamma originada en el decaimiento del 16N.
- Este elemento radiactivo solamente está originado por la reacción del flúor con los neutrones de este rango de energías. Por ello, la medida de los rayos gamma de energía del orden de 6000 keV está directamente relacionada con la proporción de flúor en la muestra original.
- Como la vida media del 7N16 es de 7,13 s., la lectura de la radiación gamma emitida debe realizarse tan pronto como sea posible.

Reacción	$T_{1/2}$ del producto de la reacción.	Energía (keV)	Intensidad %
9-F-19(n,p)8-O-19	26,88 s	1356	50,4
9-F-19(n,g)9-F-20	11,163 s	1633	99,1
9-F-19(n,α)7-N-16	7,13 s	6128	67,0
20-CA-40(n,α)18-AR-37	35,04 d	-	-
20-CA-40(n,p)19-K-40	1,248e+9 y	-	10,66
14-SI-28 (n,p)13-AL-28	2,2414 m	1778	100
14-SI-29(n,p)13-AL-29	6,56 m	1273	90,6
14-SI-30(n,α)12-MG-27	9,458 m	843	71,8
16-S-34(n,α)14-SI-31	157,3 m	1266	0,07
56-BA-138(n,g)56-BA-139	83,06 m	165	24
26-FE-54(n,α)24-CR-51	27,7010 d	320	9,910
26-FE-56(n,2n)26-FE-55	2,737 y	126	1,280E-7
26-FE-56(n,p)25-MN-56	2,5789 h	846	98,9
15-P-31(N,2A)11-NA-24	20,20 ms	2754	99,944
15-P-31(n,α)13-AL-28	2,2414 m	1778	100
15-P-31(n,p)14-SI-31	157,3 m	1266	0,07
12-MG-24(n,p)11-NA-24	20,20 ms	2754	99,944
12-MG-26(n,g)12-MG-27	9,458 m	843	71,8
33-AS-75(n,g)33-AS-76	26,24 h	559	45
33-AS-75(n,α)31-GA-72	14,10 h	834	95,63
33-AS-75(n,p)32-GE-75	47,7 s	139	39,4
80-HG-198(n,g)80-HG-199	42,67 m	158	52,3
80-HG-204(n,2n)80-HG-203	46,594 d	279	81,5

Tabla 163.Cuadro resumen de los productos de las reacciones de la fluorita con los neutrones, y sus características de decaimiento.

6. Desarrollo experimental y exposición de resultados.

El experimento se centra, en consecuencia, en la determinación del contenido en flúor de una muestra a través de la medida de la radiación gamma, de una energía de 6128,63 keV, procedente del decaimiento del 16 N, que tiene lugar con una vida media de 7,13 s.

Este 16N se produce al activar el flúor presente en la muestra mineral, a través de una reacción que tiene una sección eficaz media de 0,12 barns, si los neutrones proceden de una fuente de Americio Berilio, tal como se ve en la figura.

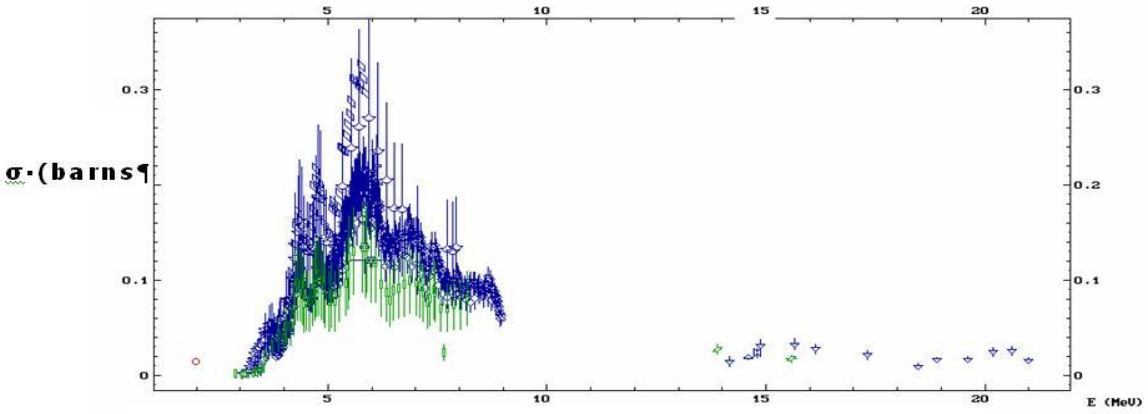


Figura 434. Sección eficaz para la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16.

Del estudio teórico se concluye que la fluorita se podrá detectar por medio de la activación neutrónica, pero se desconoce el nivel de la señal que se va a detectar, y si se puede discriminar hasta conseguir calibrar el equipo de forma que se pueda controlar las leyes en una operación minera.

Para diseñar el experimento, debemos:

[1] Definir las características de los equipos necesarios para irradiar, medir, almacenar y estudiar las señales, así como la disposición física de los mismos.

Estos equipos básicamente son:

- la fuente de neutrones de Americio Berilio y
- el detector de radiación gamma y sistema de registro,

pero deben disponerse en una configuración que sea capaz de permitir:

- Introducir la muestra en un portamuestras.
- Desplazar la muestra hasta situarla en el haz de neutrones con garantías de que el operador no reciba radiación alguna. Para realizar esta función, debe diseñarse un sistema que permita:

- dejar la muestra frente a la fuente para que sea activada durante un tiempo llamado tiempo de activación,
- desplazar la muestra en el mínimo tiempo posible, pero con exactitud en cuanto a posiciones y en cuanto a tiempos necesarios para llevar a cabo la tarea, hasta colocarla frente al detector. Durante este tiempo, el haz de neutrones que antes estaba interceptado por la muestra, debe quedar confinado por un blindaje adecuado, de manera que no irradie hacia el exterior. Este tiempo será llamado en adelante tiempo de demora o de desplazamiento.
- Dejar la fuente frente al detector el tiempo necesario para realizar la medida y el registro, que se llamará tiempo de lectura.

[2] Determinar el tamaño de la muestra con el que se obtenga una señal adecuada en el detector. A partir de cálculos y de experimentación, se debe lograr esta determinación.

[3] Determinar experimentalmente la distancia entre la fuente y la muestra para conseguir la activación de la muestra que de lugar a un máximo de señal. Para ello, se ha partido de un prototipo preliminar, realizado en función de unas estimaciones iniciales.

[4] Determinar, a través de pruebas, la posición del detector que compatibilice dos parámetros de consecuencias opuestas:

- el tiempo mínimo de colocación de la muestra frente al detector después de la irradiación,
- con el mínimo de perturbaciones externas de la señal.

[5] Determinar experimentalmente, el tiempo de irradiación, de demora y de lectura óptimos para el equipo, el tamaño de la muestra y la disposición geométrica adoptada.

[6] Determinar la influencia del tipo de contenedor de la muestra, en la señal emitida.

[7] Determinar la influencia de la altura de la muestra.

[8] Diseñar y construir el dispositivo final que reúna requisitos deducidos anteriormente.

[9] Activar y medir en un conjunto de muestras de mineral de distintas leyes.

[10] Activar y medir un conjunto de muestras de mineral de distintas granulometrías.

[11] Definir el procedimiento industrial y plasmarlo en la solicitud de una patente.

Algunos de los aspectos mencionados anteriormente se determinan de modo experimental por lo que la metodología de la experimentación propuesta, se llevará a cabo

- partiendo de unas consideraciones iniciales, se realiza un primer prototipo.
- realizando medidas previas,

- rediseñando un nuevo prototipo,
- realizando nuevos experimentos y
- así sucesivamente hasta conseguir el prototipo definitivo.

En los siguientes capítulos se exponen los contenidos:

- se exponen algunas consideraciones generales respecto a ciertos parámetros experimentales que se usarán en las medidas.
- se describen los equipos e instrumentación utilizada, en los ensayos de laboratorio, y se justificará su uso,
- Se detallan los diseños, fabricación y procedimientos de operación con los prototipos realizados,
- Se mostrarán los resultados de estos experimentos. Estos resultados se muestran de forma abreviada, es decir, con valores numéricos resultados de la integración de las cuentas en unos intervalos de canales determinados.
- En el capítulo 7 se exponen y analizan los resultados más relevantes, considerando, en este caso los espectros de energía.
- En el capítulo 8 se expone un procedimiento para la mejora de la resolución del proceso de activación.

6.1. Consideraciones generales sobre las medidas.

Para la realización práctica del primer prototipo se han tenido en cuenta las consideraciones que se exponen a continuación respecto al tiempo de irradiación, tiempo de lectura y resolución de los detectores.

6.1.1. Tiempo de irradiación.

En un estudio inicial, para estimar el tiempo de irradiación, vamos a considerar detenidamente el proceso de activación:

- Por una parte, la fuente está constantemente produciendo 3,7 10^{10} neutrones por segundo. La muestra situada a una distancia de 40 cm. recibiría un flujo de aprox. 1,85 10^{6} n/s/cm^2. Si estuviera a 10 cm, el flujo sería de aprox. 3 10^{7} n/s/cm^2, y a 2 cm aprox. 7 10^{8} n/s/cm^2.
- al incidir un neutrón sobre un núcleo de flúor, se produce la reacción conocida de 9-F-19(n,α)7-N-16.

- la probabilidad de que se produzca esta reacción es, expresada en términos de sección eficaz σ, de 0,12 barns.
- como resultado de esta reacción se produce nitrógeno 16.

En conclusión, por una parte, se van generando átomos de 16N ante la acción de los neutrones con el flúor, y por otra parte, los átomos formados van desapareciendo, siguiendo una ley bien definida y que depende, entre otras cosas, de la cantidad de nitrógeno formado en la muestra.

Deseamos conocer si existe un tiempo, una vez que comienza el proceso, en el cual la concentración de nitrógeno sea máximo, o incluso, si llega a ser estable. Para ello, vamos a buscar la relación entre la concentración nitrógeno en el sistema, y el tiempo.

Llamemos:

- n a la concentración de nitrógeno del sistema, que varía con el tiempo.
- n_s al número de átomos de nitrógeno que van desapareciendo.
- n_e al número de átomos de nitrógeno que van apareciendo.

En la Figura 435 se muestra un esquema de la producción y desaparición de los átomos de nítrógeno.

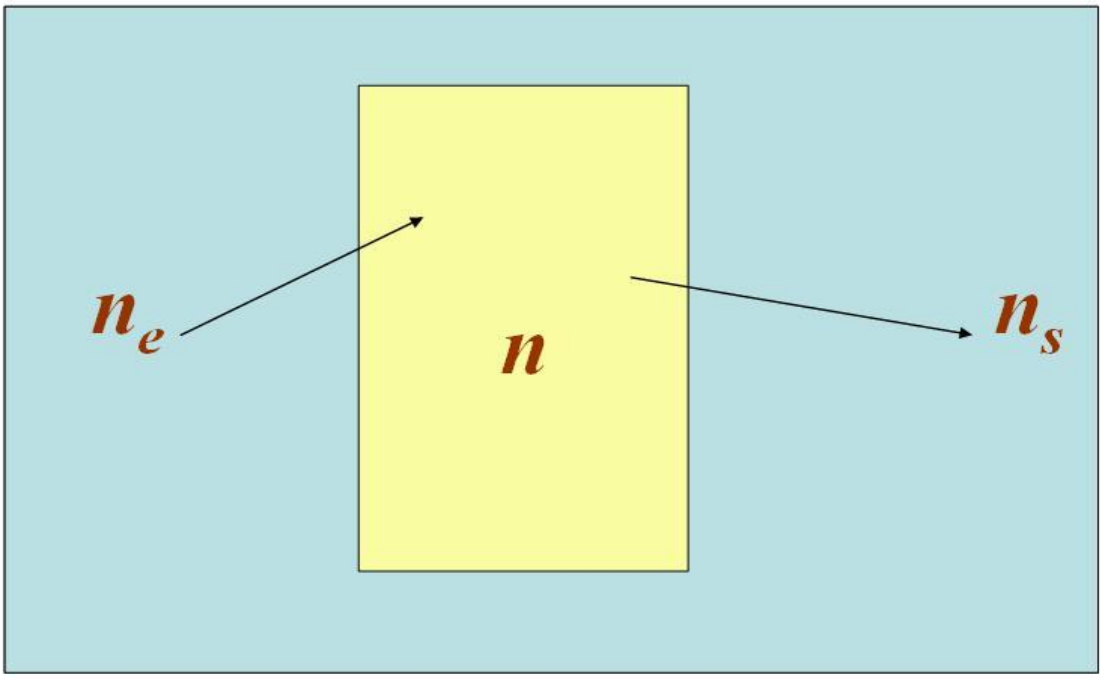


Figura 435. Balance de núcleos de 16N.

Se cumple que el número de átomos de nitrógeno presentes en un instante dado, es la diferencia entre los que entran en el sistema, y los que salen del mismo en ese instante.

Es decir, si los que entran en el sistema son:

$$n_e = Kt \quad [8]$$

donde, K es un parámetro que depende:

- del flujo de neutrones,
- de la concentración de átomos de F en la muestra y,
- de la sección eficaz de la reacción del flúor con los neutrones.

se tiene que:

$$\frac{dn_e}{dt} = K$$

Por otra parte, el número de los que salen del sistema, depende de los que se encuentran en el sistema, y decaen según una ley exponencial,

$$\frac{dn_s}{dt} = \lambda n \quad [9]$$

donde λ es la constante de semidesintegración, igual a $\ln 2/T_{1/2}$, con $T_{1/2}$ el periodo de semidesintegración, que para el 16N es 7,13 s.

En consecuencia, la variación total instantánea de 16N será:

$$dn = Kdt - \lambda ndt$$

Por lo que,

$$\frac{dn}{dt} = K - \lambda n$$

Que podemos expresar como

$$\frac{dn}{dt} + \lambda n = K$$

Para resolver esta ecuación diferencial, partimos de la conocida solución a la siguiente ecuación diferencial:

$$y' + a(x)y = b(x)$$

y que es la siguiente:

$$y = e^{-\int a(x).dx}.\left[C + \int b(x)e^{\int a(x)dx}dx\right]$$

En nuestro caso

$$a(x) = \lambda$$

y

$$b(x) = K$$

por lo que sustituyendo en la ecuación anterior, nos queda que,

$$n = e^{-\int \lambda dt}\left[C + \int K e^{\int \lambda dt} dt\right] = e^{-\lambda t}\left[C + K\int e^{\lambda t} dt\right]$$

De donde,

$$n = e^{-\lambda t}\left[C + K e^{\lambda t}\right] = C e^{-\lambda t} + K e^{-\lambda t} e^{\lambda t} = C e^{-\lambda t} + K$$

Para t=0, n=0, lo que significa que:

$$0 = C e^{-\lambda 0} + K$$

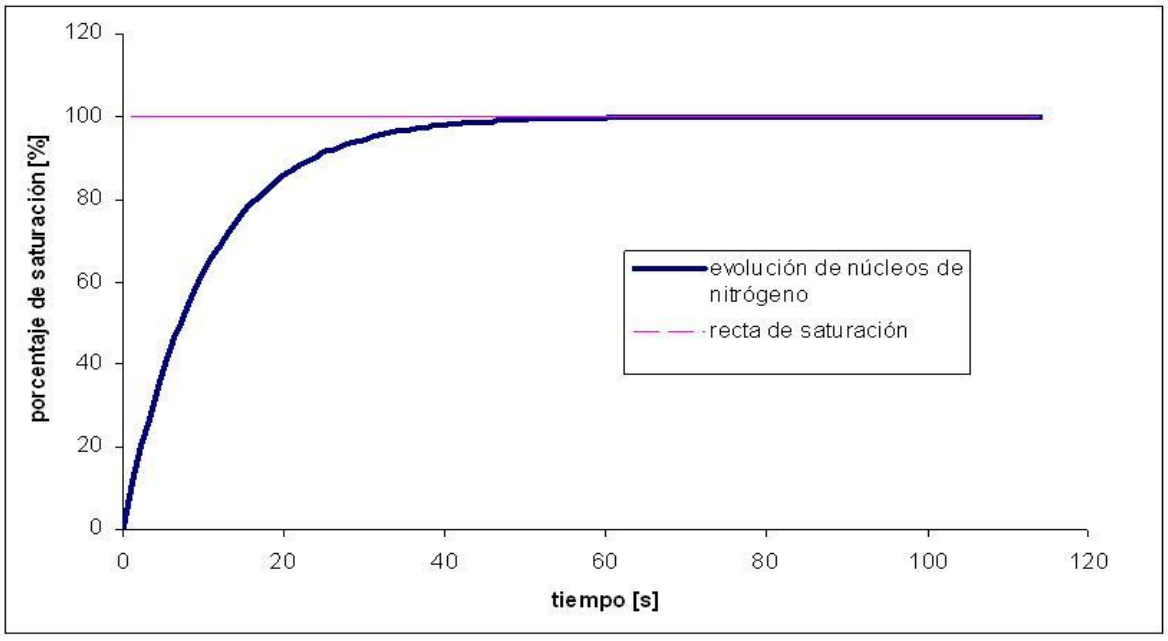
En consecuencia,

$$C = -K$$

Por lo que finalmente, nos queda que,

$$n = K\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad [10]$$

Que tiene una forma del tipo mostrado en la Figura 436:



]

Figura 436. Variación de la concentración de 16N con el tiempo de irradiación.

A la vista de este análisis, se obtiene como conclusión que la concentración de 16N crece continuamente, exponencialmente con una asíntota en el valor K, que hemos llamado recta de saturación. Esto significa que, tras un periodo inicial, que habitualmente se evalúa del orden de 6-7 veces el periodo de semidesintegración $T_{1/2}$, la diferencia entre el valor de la función y el valor de la asíntota es suficientemente bajo como para considerarlo, a todos los efectos, nulo. En la Tabla 164, se ve resultado del cálculo del porcentaje de saturación en función del tiempo de irradiación.

T=7,13 s		
Nº periodos	**Tiempo irradiación [s].**	**% de saturación**
5	35,65	96,875
6	42,78	98,438
7	49,91	99,219
8,415	60	99,707
16,830	120	99,999

Tabla 164. Porcentaje de saturación del 16N en función del tiempo de irradiación.

Sin embargo, una vez se saca la muestra del campo de acción de los neutrones, la actividad del 16N decae según se ve en la Figura 437, siguiendo una función exponencial. Cuanto más tiempo transcurra desde el fin de la irradiación, tanto menor concentración de 16N, se encontrará presente en la muestra.

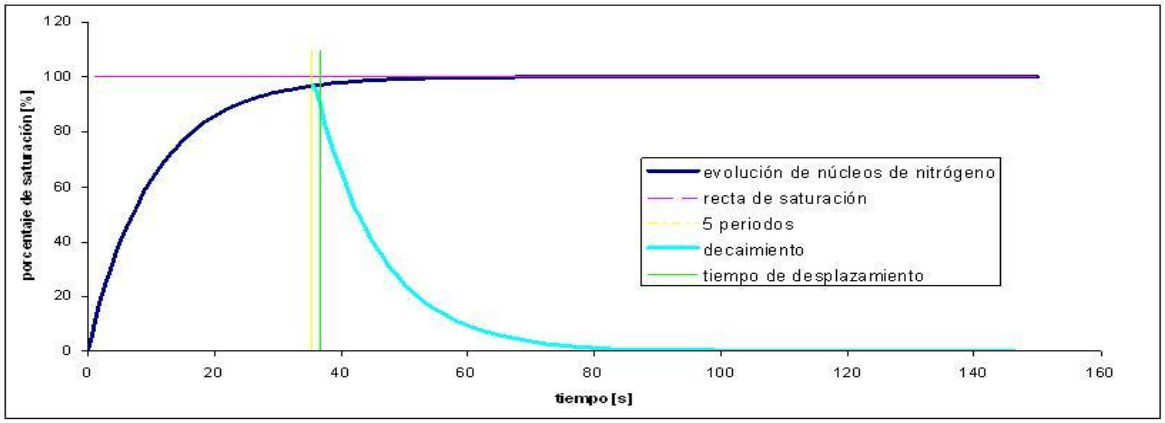


Figura 437. Variación de la concentración de 16N después de un tiempo de irradiación de 36 s.

En la Figura 438, se observa la trascendencia del tiempo de irradiación en el contaje de la concentración de 16N. En el primer caso se ha irradiado durante 36 segundos. A partir de este instante decae la concentración de 16N y si la lectura se hiciera inmediatamente se comprobaría que la lectura sería alta. En otro caso, se ha mantenido la irradiación durante 60 s (línea marrón), y se ha leído en un instante posterior (línea azul). Se comprobaría en esta circunstancia que la lectura sería considerablemente menor aún después de haber tenido la muestra irradiando durante más tiempo.

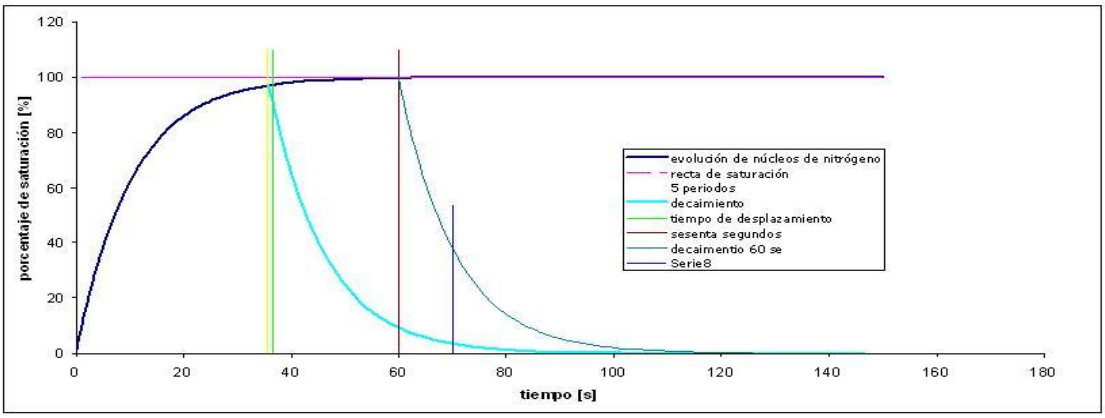


Figura 438. Influencia del tiempo de irradiación y del tiempo de demora de la medida.

6.1.2. Tiempo de lectura.

Hasta ahora se ha hablado de la concentración de 16N en un instante determinado, dentro del sistema, y se ha visto que está representada por la curva de la Figura 438. Sin embargo, el detector y el sistema de registro de la radiación, totaliza las radiaciones recibidas por el detector durante un tiempo dado, que es el tiempo de lectura. El detector, por tanto, da una respuesta que representa el área bajo la curva de decaimiento durante un tiempo determinado.

Por otra parte, las lecturas llevadas a cabo por el detector ante la presencia de una muestra de fluorita activada, tienen dos componentes:

- Una lectura que representa las cuentas leídas en ausencia de muestra de la fluorita activada, y que son las que llamaremos fondo, y
- las cuentas leídas originadas por la muestra activada, valor que denominaremos genéricamente, señal.

La ejecución de la lectura de la radiación procedente de una muestra activada debe ser tal que:

- Las cuentas procedentes de la muestra activada sean muy altas.
- Las cuentas procedentes del fondo sean muy bajas,
- y, por último la relación entre la señal/fondo sean elevadas.

En principio se podría pensar en la conveniencia de un tiempo de lectura elevado, que es el que daría una mayor cantidad de cuentas recogidas en el detector, sin embargo, se observa que, según la Figura 439:

- la concentración de 16N varía de forma exponencial decreciente, y, por tanto, las cuentas instantáneas (cuentas/tiempo), procedentes de la muestra activada,

varían en el tiempo según una curva semejante, tal como se ha justificado anteriormente.

- Por otra parte, las cuentas leídas por el detector en ausencia de la muestra de fluorita activada se mantiene constante a lo largo del tiempo. Por tanto las cuentas acumuladas procedentes del fondo aumentan con el tiempo de forma lineal.

En conclusión, si bien tiempos de lectura más largos son positivos desde el punto de vista de aumentar el número de cuentas totales, en contrapartida recogen más cuentas procedentes del fondo que de la muestra, dando una relación señal/fondo que empeora.

Con estas ideas generales se ha planteado el desarrollo experimental.

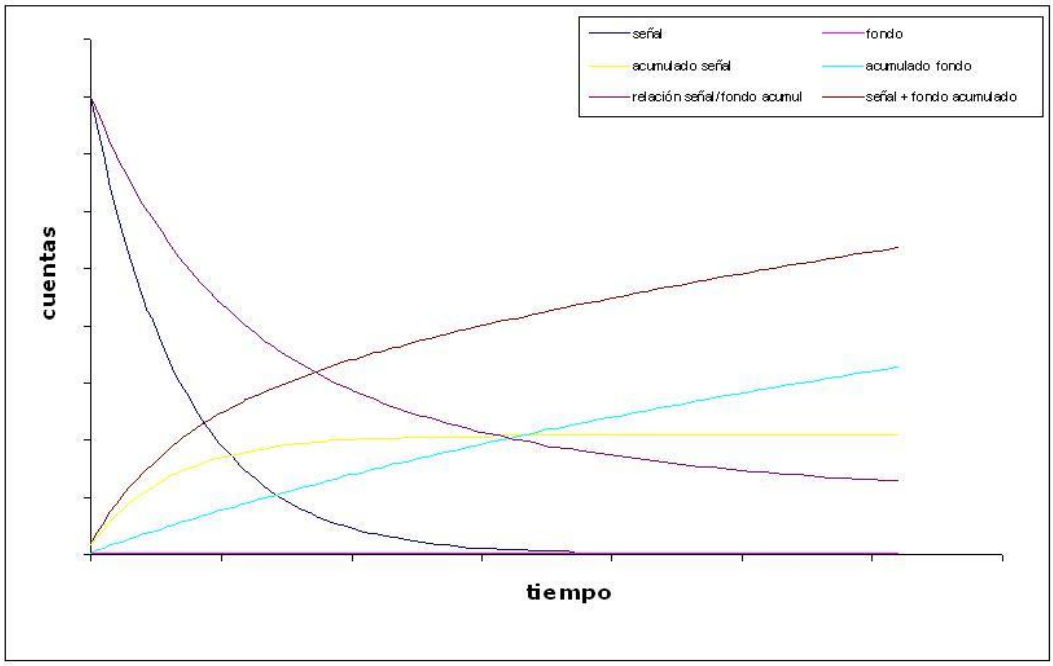


Figura 439. Relación señal ruido.

6.1.3. Resolución del detector y nivel de energía de los rayos gamma emitidos.

Una propiedad importante de un detector para su uso en espectrometría es la capacidad para poder discriminar partículas ionizantes de energía muy próximas entre sí.

Si se tienen dos detectores distintos, simultáneamente expuestos a radiación monoenergética proveniente de un cierto radionucleído las respectivas distribuciones de amplitudes de impulsos (función respuesta de cada detector) se muestran en la Figura 440.

La forma del pico es una campana de gauss ya que responde únicamente a parámetros aleatorios que siguen una normal.

Aunque ambas distribuciones están centradas en el mismo valor E, el ancho de ambas difiere notablemente. Estos anchos reflejan la magnitud distinta de las fluctuaciones estadísticas, de las señales producidas en cada interacción, suponiendo que por cada interacción se aportó la misma energía al detector.

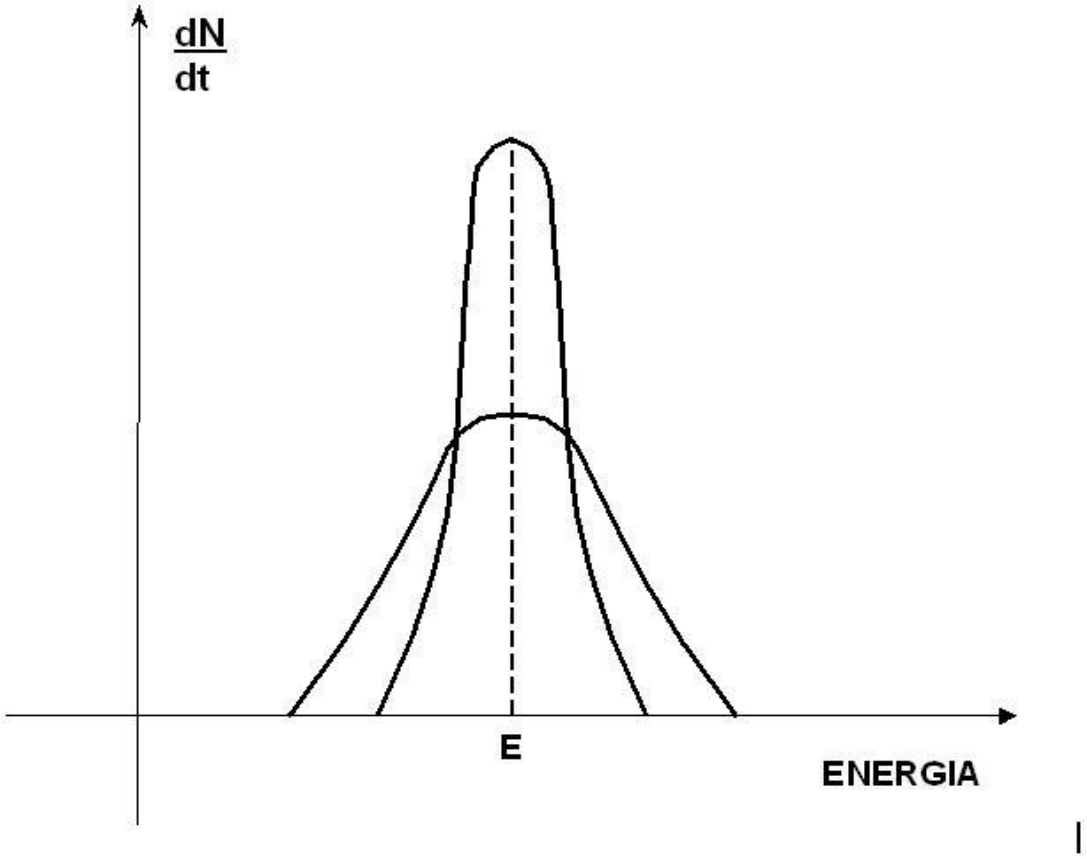


Figura 440. Respuesta de dos detectores con distinta resolución.

La capacidad de un detector para discriminar las energías de las partículas ionizantes incidentes es tanto mayor cuanto menor sea el ancho de su función respuesta. Ello se cuantifica con un parámetro denominado "resolución" del detector, el cual se define como el ancho a mitad de altura (AMA) de la función distribución de amplitudes de las señales, para partículas ionizantes monoenergéticas, dividido por la energía (E) del pico Figura 441:

$$r = \frac{AMA}{E}$$

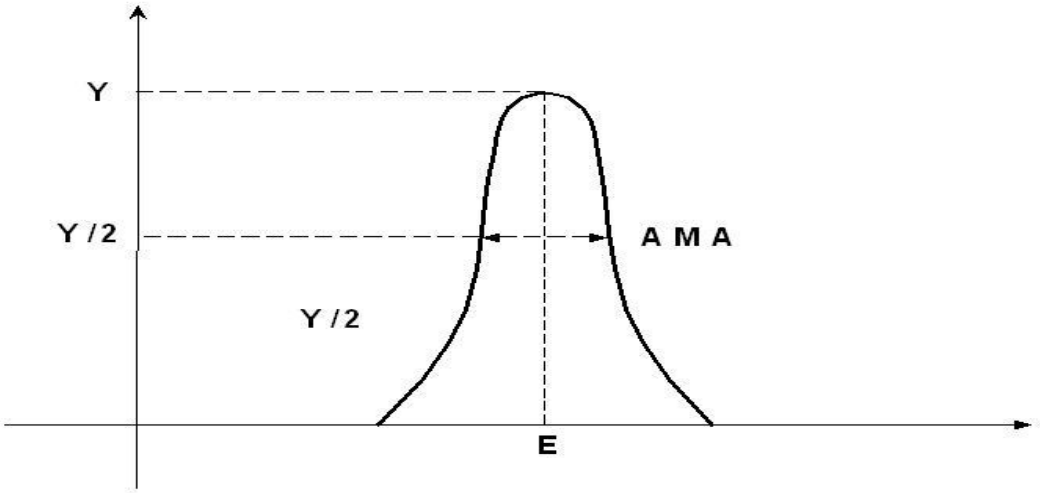


Figura 441. Parámetros de la función resolución.

La resolución es un parámetro adimensional. Cuanto menor sea el valor de la resolución de un detector dado, mejor diferenciará energías de valores cercanos entre sí.

En nuestra aplicación se dan simultáneamente dos situaciones:

- Por un lado el nivel de energía de los rayos gamma procedentes del decaimiento del 16N es elevado, Es decir, para los 6 MeV. de nuestro experimento, el ancho de la función distribución a mitad de la energía (AMA) es 6 veces mayor que el ancho que tendría dicha función si la radiación fuera de 1 MeV.
- Por otro se prevé que la densidad de cuentas por unidad de tiempo será baja.

Por ello se sospecha que las cuentas procedentes de la activación de la muestra de fluorita vayan a aparecer diseminadas en un amplio rango de energías en vez de formar un espectro en forma de campana más o menos puntiagudo.

La consecuencia práctica es que si el nivel de energía que queremos medir es de 6 MeV y tenemos pocas cuentas provenientes de la muestra activada tendremos que observar las cuentas que aparecen en un intervalo centrado en 6 MeV, más y menos un cierto incremento de energía que hay que estimar y después ajustar a través de ensayos. Si este incremento fuera, por ejemplo, de ±3 MeV., el intervalo de energías en el que habría que contabilizar las cuentas, sería entre 3 y 9 MeV.

6.2. Equipo e instrumentación utilizada.

El Laboratorio de Energía Nuclear del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo dispone de varios equipos que son potencialmente útiles para los fines de este experimento. Se ha planteado el desarrollo del mismo utilizando estos equipos hasta

conseguir unas conclusiones que permitan abordar la adquisición de equipos más específicos.

Por esta razón se ha iniciado el experimento adaptándolo a las características del equipamiento existente, que es el que se describe a continuación.

6.2.1. La fuente de neutrones y su contenedor.

La fuente de neutrones utilizada en los experimentos es de Americio Berilio del Laboratorio de Energía Nuclear del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo. La fuente, propiamente dicha, es una aleación de dos metales, Americio 241 y Berilio 9, montada en una doble cápsula cilíndrica de acero inoxidable. Esta doble cápsula tiene unas dimensiones de 35mm de longitud por 30mm de diámetro. Su contenido en Americio es 0,309 g con una actividad de 1 Ci. La fuente tiene una emisión de $3,7*10^{10}$ neutrones por segundo.

La fuente está alojada en un contenedor cilíndrico de acero inoxidable de grandes dimensiones, (φ=565 mm, altura = 802 mm, espesor = 5 mm).

A continuación se describe la geometría del contenedor de la fuente, las medidas de seguridad respecto a su manipulación, la operación estándar de activación con dicha fuente y finalmente, el proceso de extracción de la fuente del contenedor.

[1] Descripción geométrica del contenedor de la fuente.

La fuente está alojada en un *tubo portafuentes móvil* de metacrilato que tiene un diámetro de 40 mm. y una longitud de 240 mm., menor que el diamétro del contenedor, según se aprecia en la Figura 442. En el interior se encuentra relleno de parafina borada excepto en la parte en la que está la fuente. Los ejes de simetría de la fuente y el tubo portafuentes son horizontales. (Fotografía 3). Este tubo tiene una *ranura* que está colocada en su parte superior, cuya función es limitar el recorrido posible del tubo móvil en una dirección.

El tubo portafuentes móvil de metacrilato se encuentra en el interior de otro *tubo guía horizontal de acero* inoxidable de 40 mm. de diámetro que atraviesa el contenedor cilíndrico, también de acero inoxidable de 5 mm de espesor. Sobre este tubo de acero se aloja un tope de acero de seguridad que encaja en la ranura del tubo portafuente móvil, y que limita el recorrido del tubo móvil hacia el exterior. En sus extremos, y en el exterior del contenedor, se roscan dos tapones, uno en la parte del tubo interior fijo y otro en la parte móvil, que con sendos candados impide la manipulación de la fuente a personas ajenas a la operación.

Existe otro *tubo fijo* de metacrilato relleno de parafina borada que completa el hueco del tubo de acero inoxidable.

El *contenedor* de eje vertical, tiene las dimensiones y el diseño que se aprecian en la siguiente figura y en la Fotografía 1, y dispone de una tapa superior.

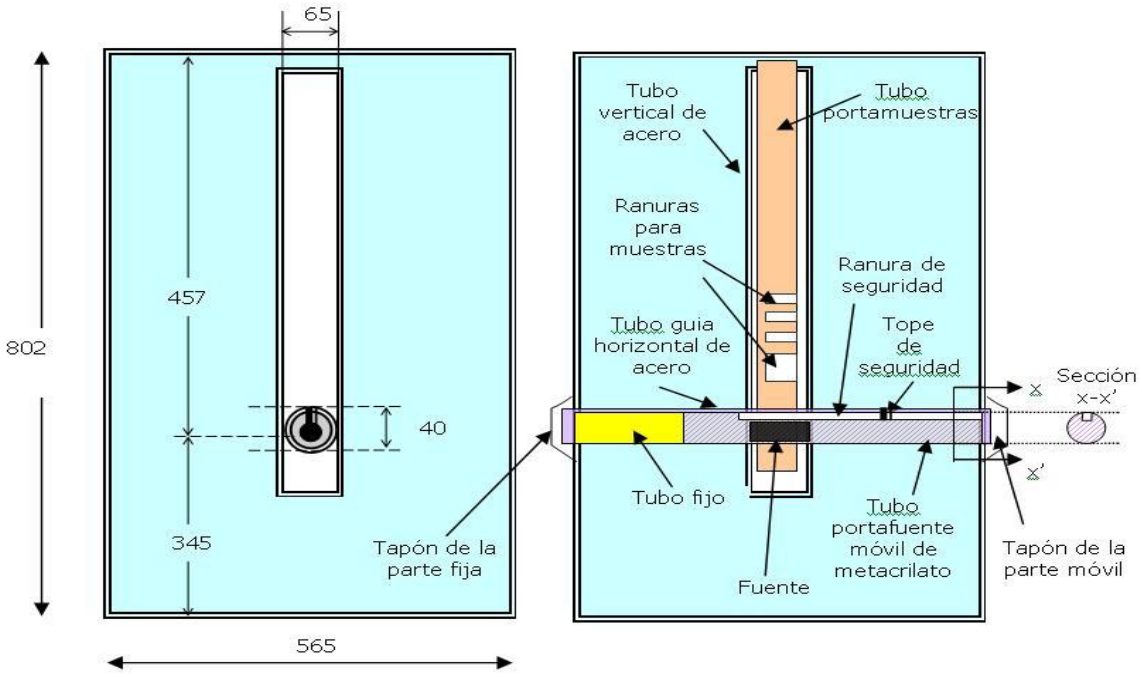


Figura 442. Contenedor cilíndrico de la fuente.

El contenedor tiene además, situado concéntricamente en su interior, un nuevo *tubo vertical de acero* inoxidable de 65 mm de diámetro donde se aloja otro *tubo portamuestras* de metacrilato relleno de parafina, con varias ranuras donde se pueden colocar distintas muestras para ser irradiadas por la fuente de neutrones. Estas ranuras tienen diferentes alturas, la mayor de 35 mm, por lo que el volumen máximo de la muestra es de menos de 50 cm^3 (Fotografía 2). El tubo portafuente móvil penetra por la parte inferior del tubo portamuestras como medida de seguridad.

En la misma Fotografía 2 puede verse que el espacio comprendido entre el contenedor y el tubo interior concéntrico con él, se encuentra relleno de un material: parafina borada que constituye el elemento moderador de los neutrones rápidos, y absorbente de los neutrones lentos. Por esta razón, al contenedor se le denomina en ocasiones por la misión que desempeña, es decir, en ocasiones se le denomina "blindaje". Esto permite el uso de la fuente con seguridad.

Contrasta fuertemente la diferencia que existe entre el tamaño de la fuente (35 mm de longitud y 30 mm. de diámetro), respecto al tamaño de su blindaje, (802 mm de altura y 565 mm de diámetro).

[2] Medidas de seguridad de la fuente. Son las siguientes:

- Los tapones y candados de la parte fija y de la parte móvil del tubo guía horizontal de acero

- El tope y la ranura de seguridad impide extraer el tubo portafuentes móvil más allá de una longitud determinada.
- La penetración del tubo portafuentes móvil en el portamuestras. De esta forma, no saldrá nunca radiación de la fuente directamente al exterior, sino a través de una longitud conveniente de parafina.

[3] Operación estándar de activación.

El diseño del conjunto está condicionado por la necesidad de prevenir los posibles errores de manipulación que tendrían como consecuencia que el operador quedase expuesto a la radiación directa de la fuente. Así, es necesario retraer parcialmente el tubo portafuentes para la incorporación de la muestra en el portamuestras, pero existe un tope y una ranura de seguridad en el tubo portafuentes, que impide que se extraiga en exceso. De esta manera siempre existe una protección de parafina borada que impide la exposición directa a la radiación de la fuente.

Para llevar a cabo una operación de activación, entonces, es necesario colocar la muestra en la ranura. Pero como el portamuestras está atravesado por el tubo portafuentes móvil, se ha de seguir escrupulosamente, la secuencia de trabajo siguiente: (Figura 443):

a. extraer el tapón de la parte móvil.
b. Desplazar el tubo portafuentes móvil hasta su posición extrema, definida por el tope de seguridad que llega a tocar el fin de la ranura de seguridad como se observa en la Figura 443. En esta posición la fuente se encuentra en el blindaje pero no atravesando el tubo portamuestras.
c. Extraer el tubo portamuestras.
d. Colocar la muestra en la ranura.
e. Introducir el portamuestras.
f. Retornar la fuente a su posición original.
g. Mantener el tiempo de activación.
h. Retirar la fuente.
i. Extraer la muestra y colocarla junto al detector.
j. Poner el portamuestras en su sitio.
k. Colocar la fuente de nuevo en su sitio.
l. Volver a poner el tapón de la parte móvil.

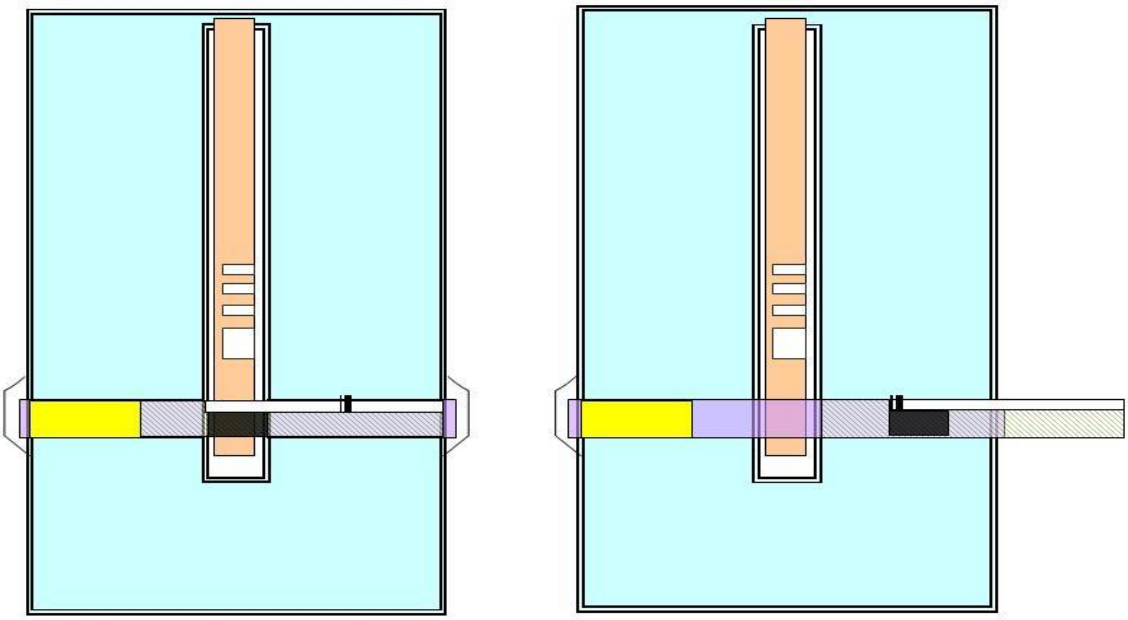


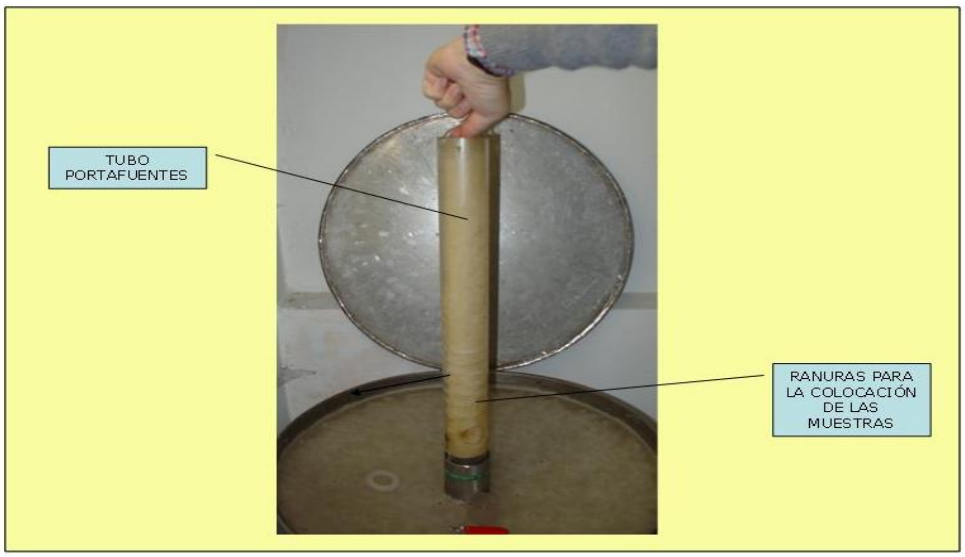
Figura 443. Operación estandar de activación con el contenedor original.

En las siguientes fotografías pueden verse distintos aspectos del contenedor de la fuente de neutrones.

En la Fotografía 1, donde se aprecia el aspecto exterior del contenedor de acero, puede verse ligeramente el tubo portafuentes que se sitúa horizontalmente y tiene dos pequeñas tapas con rosca y candados para evitar errores en la manipulación. En esta fotografía, también puede verse la tapa del blindaje.

Fotografía 1 . Aspecto exterior del contenedor de la fuente.

En la Fotografía 2 se puede ver el contenedor con la tapa levantada, dejando a la vista el relleno de parafina que ocupa el hueco entre el exterior del contenedor y el tubo portamuestras. Se aprecia el tubo portamuestras extraído para permitir alojar las muestras a distintas distancias de la fuente.



Fotografía 2. Vista del contenedor con el portamuestras extraído. Vista del relleno de parafina.

En la Fotografía 3 se observa el tubo portafuentes semiextraído.

Fotografía 3. Vista del tubo portafuentes móvil semiextraído. Este tubo pasa por el interior del tubo portamuestras para garantizar la seguridad en la manipulación.

[4] Extracción de la fuente del contenedor.

Para extraer la fuente hay que seguir los siguientes pasos:

i. Quitar el candado y desenroscar los tapones.

ii. Empujar el tubo portafuente móvil de metacrilato desde el lado del tapón de la parte móvil. En este punto se extrae todo el conjunto por el otro lado: primero sale el tubo fijo y después el tubo móvil.

Esta operación debe llevarse a cabo con estrictas medidas de seguridad, con un objetivo muy claro, y antes de realizarla debe planificarse detenidamente el destino de dicha fuente.

6.2.2. El detector

Se ha utilizado un detector de INA dopado con talio de 2" de diámetro. Se comenzó utilizando un detector de 3", pero finalmente, los ensayos se hicieron con un detector de 2". Ante el desconocimiento de la respuesta que iba a dar, se utilizó el detector disponible, aún sabiendo que, en principio su rendimiento a elevadas energías no lo hacía el más idóneo. En la Fotografía 4, se muestra una imagen del detector montado sobre el fotomultiplicador.

Fotografía 4. Detector junto con el fotomultiplicador sobre una hoja de papel DIN-A4.

6.2.3. Zócalo del tubo foto multiplicador - preamplificador. Modelo 2007 P.

Se ha utilizado el modelo 2007 P de Canberra, que se monta directamente en un tubo foto multiplicador (PMT). Tiene capacidad de alimentarse con tensiones de hasta + 2 kV de corriente continua, y un control de foco y ganancia separado.

El modelo 2007 P es un zócalo que combina varias propiedades, por un lado ruido bajo, y por otro lado una capacidad de amplificar sensible a la carga. A su vez, está dotado con una protección de transitorios de alta tensión.

Contiene una red de divisores de alto voltaje para suministrar todos los voltajes necesarios para los más habituales tubos foto multiplicadores de 10 pasos.

Un control del foco permite la optimización de la resolución del detector, y el control de la ganancia permite recortar las altas tensiones cuando se deben compaginar diversos tubos.

Este zócalo es compatible con múltiples detectores de centelleo y el zócalo se conecta directamente al tubo foto multiplicador, formando un conjunto de montaje compacto.

El modelo 2007 P, incluye un preamplificador, el cual integra el pulso de la carga desde el ánodo del tubo foto multiplicador y lo amplifica.

Las características del preamplificador son: protección de transitorios de alto voltaje, una contribución al ruido de menor de 0,1fC rms y un tiempo de subida de menos de 20 ns.

[1] Entradas

- Detección de la señal: la entrada del preamplificador está acoplada internamente al ánodo, a través del pin 11 de la conexión del tubo foto multiplicador.
- Alta tensión. Ajusta la tensión a la necesaria del tubo foto multiplicador hasta un máximo de 2 kV dc.

- Test: pulsos positivos o negativos a partir de un generador de pulsos; carga acoplada a 30 pC/V, Z_{in}= 93 Ω
- Alimentación del preamplificador: ± 12 voltios dc desde un amplificador principal asociado, a través de un cable compatible.

[2] Salidas.

- Señal del preamplificador: pulso invertido; tiempo de subida <20 ns; tiempo de caída 50 µs nominal; hasta + 10 voltios a través de series conectadas a resistencias de 93, Ω; acoplamiento directo.

[3] Controles

- Foco: ajuste con un giro sencillo del destornillador para optimizar la resolución.
- Ganancia: ajuste con un giro sencillo del destornillador.

[4] Prestaciones

- No linealidad integral: < ± 0,4% hasta + 10V de salida.
- Deriva de la ganancia: <± 0,01%/ºC
- Aislamiento del circuito del tubo del fotomultiplicador: + 2000 V dc como máximo.
- Ruido < 1 fC
- Sensibilidad de la carga: 4,5 mV/pC, nominal.
- Circuito del divisor de tensión: resistencia total 7,2 MΩ, nominal; 10 dínodos a 72 V por kV dc del bias del detector; resistencia limitadora de la ánodo 560 kΩ

[5] Requerimientos de potencia.

- Preamplificador- ±12 V dc en 15 mA
- HV- 0-2 kV dc en 0-300 µA

[6] Tamaño.

- Tamaño – 7,6 5,8 cm x (3 x 2.3 in) (l x d).
- Peso neto- 0.14 kilogramos (0.3 libras).
- Peso de transporte- 1.2 kilogramos (2.7 libras).
- Temperatura ambiental de funcionamiento - 0 a 50 °C.

Fotografía 5. Detector y zócalo del preamplificador Modelo 2007P.

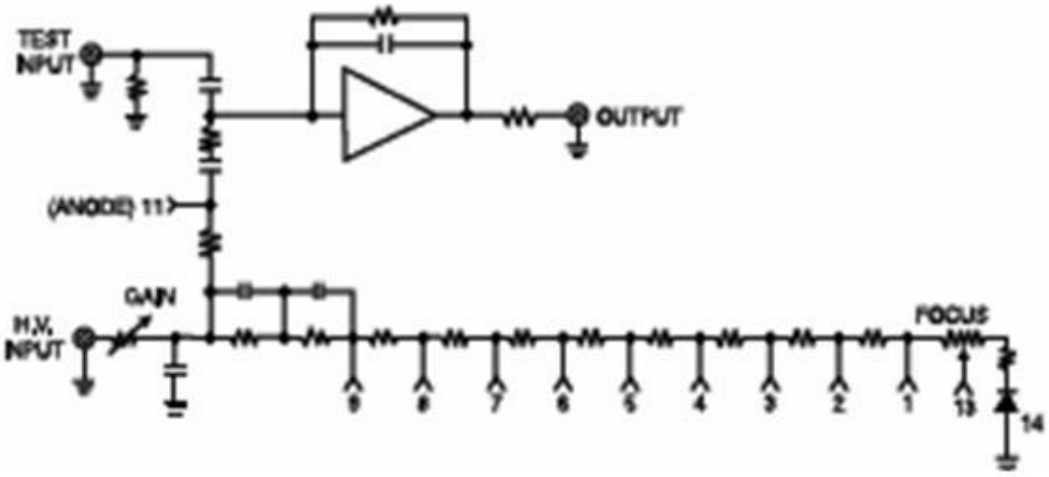


Figura 444. Esquema funcional: Modelo 2007P.

6.2.4. Fuente de alta tensión ORTEC 556/556H.

Se emplea con tubos fotomultiplicadores, contadores proporcionales, y tubos Geiger-Müller. Sus características son:

- 0 a ±3 kV
- 0 a 10 mA.
- Protegido contra sobrecarga y corto circuito.
- Control externo del voltaje de salida.
- 115 o 230 V potencia de entrada.

La fuente de alta tensión debe proporcionar altos voltajes sin ruido, estar bien regulada y ser estable, que son los requisitos necesarios para operaciones con fotomultiplicadores, cámaras de ionización, detectores de semiconductor, multiplicadores de electrones, y muchos otros dispositivos.

El modelo 556 utilizado se coloca en un módulo con doble ranura NIM (DOE/ER-0457T). La salida (bajo ruido) se puede ajustar continuamente de ±10 a ±3000 V dc con una corriente de 0 a 10 mA. El ruido de salida entre picos es inferior a 10 mV. De este modo asegura

mayor resolución en sistemas semiconductores o sistemas de espectroscopia de centelleo.

El panel delantero digital permite supervisar visualmente la corriente y voltaje de salida.

El voltaje de salida puede ser controlado de ±10 a ±3000 V aplicando un voltaje externo de entrada de 0 a ±6.9 V dc. Esta característica es importante en el control de las unidades.

La potencia de entrada en los modelos 556 y 556 H se toma directamente de la línea 115 o 230 V ac, 47 a 63 Hz.

La protección contra sobrecarga y cortocircuito permiten operar en pequeños circuitos sin riesgo para el instrumento.

[1] Funcionamiento:

- POLARIDAD DE SALIDA- Positiva o negativa, seleccionado por interruptor del situado en la parte posterior del panel.
- GAMA DE SALIDA- 50 a 3000 V; mínimo voltaje empleado 10 V.
- CAPACIDAD DE CARGA DE SALIDA- 0 a 10 mA.
- REGULACIÓN- Variación del 0.0025 % en el voltaje de salida para línea combinada y variaciones de corriente dentro de los rangos operacionales a temperatura ambiente y constante.
- INESTABILIDAD DE TEMPERATURAS- <±50 ppm / ° C después de un calentamiento de 30 minutos; rango operativo de 0 a 50°C.
- FLUJO A LARGO PLAZO <0.01%/ hora y <0.03%/24-horas variando el voltaje de salida y una línea de voltaje de entrada constante, carga y temperatura ambiente después de 30 minutos de calentamiento.
- ONDA DE SALIDA < 10 (entre picos) de mV, 20 Hz a 20 MHz.
- PROTECCIÓN DE SOBRECARGA el trazado de circuito interno protege contra sobrecargas
- RESETEABILIDAD El voltaje de salida puede reiniciarse en un 0.1 %.

[2] Indicador.

- El Panel delantero LCD indica el voltaje de salida en kV ±10 V o la corriente de carga en mA ±10 μ A. La corriente de carga es la suma de la carga externa e interna. La resistencia de carga interna es ~5 MW.

[3] Eléctrica y mecánica.

- Requerimiento de potencia: Carga de salida nominal y máxima 115 o 230 V ac, 47-63 Hz, 70 W

[4] Peso neto y dimensiones:

- Modelo 556

  3,6 kg.

  Módulo NIM estándar anchura doble, 6,90 x 22,13 cm.

- Modelo 556H

  5,7 kg.

  11.43 x 22.35 x 29.21 cm

[5] Controles:

- POTENCIA- Cuando se conecta a la red el cable eléctrico se ilumina un led rojo del panel frontal.
- VOLTAJE DE SALIDA- Consta de un interruptor de 6 posiciones, un interruptor de 5 posiciones, y un potenciómetro de 10 vueltas de precisión. El voltaje de salida es la suma de los 3 ajustes.
- En el panel delantero se selecciona el voltaje de salida en V o la corriente en mA.
- POLARIDAD- El interruptor que se encuentra situado en la parte posterior del panel permite seleccionar la polaridad de salida positiva o negativa.
- CONTROL- El panel situado en la parte posterior permite seleccionar el voltaje de salida de la fuente.
- INT- Selecciona la fuente de referencia interna; con los mandos de panel frontal se selecciona el voltaje de salida.
- EXT- Selecciona la fuente de referencia externa; el voltaje de salida es proporcional a la magnitud de entrada de referencia.
- AC VOLTAJE- El interruptor situado en la parte posterior del panel permite seleccionar entre 115 V o 230 V ac en el voltaje de entrada.

[6] Entradas:

- AC POTENCIA- 103-129 V o 206-258 V, 47-63 Hz, 70W nominal de salida completa; suministrada por el conector de potencia estándar e internacional IEC del reverso del panel. Fusible: 1.5 A, 250 V
- CONTROL EXTERNO El rango de voltaje en la salida puede estar basado en un nivel de referencia de dc externo proporcionado sobre el conector BNC del panel posterior; el rango de voltaje de control es 0 a ±6.9 V dc; la polaridad de voltaje de control debe ser la misma que la seleccionada por el panel posterior en el interruptor de polaridad; entrada protegida contra sobrevoltajes> ±7 V. Impedancia de entrada> 45 kΩ.

[7] Salidas:

- SALIDAS REGULADAS dc- El voltaje ajustado y regulado, con la polaridad seleccionada, es

proporcionada simultáneamente a los dos conectores SHV sobre el panel posterior.

6.2.5. Convertidor analógico digital Canberra 8701.

[1] Características.

- ADC Wilkinson de 100 megaciclos
- Resolución del canal 8K
- Compensación digital en 128 incrementos del canal
- Linealidades excepcionales (análisis <0,7%, integral < 0,025%)
- Análisis de altura de pulsos usando detección automática máxima o provocando retraso.
- Análisis análogo del voltaje de la muestra
- Rechazo de pulsos apilados y corrección del tiempo vivo entre caras.
- Compatible con la pérdida de cuentas en el Sistema. [246].

[2] Descripción:

El modelo 8701 es un convertidor analógico digital de 100 megaciclos Wilkinson diseñado para proporcionar 8192 canales completos de resolución en una amplia gama de usos. Su linealidad excepcional mejora el pico máximo y la resolución de modo que mejora el funcionamiento total del sistema de espectroscopia.

La ganancia concéntrica y los controles de rango junto con la compensación digital permiten que el usuario maximice el uso de la memoria limitada del MCA seleccionando solamente una gama específica de la energía de interés. Esto puede ser particularmente útil en usos multi-entrada como en el caso de la espectroscopia alfa, eliminando la necesidad de amplificadores antiguos con polarización negativa. Estos controles digitales logran mayor exactitud.

La conversión para el modo de altura de pulso en análisis (PHA) se puede iniciar automáticamente usando un detector de pico interno que funciona con el borde posterior del pulso de entrada, o se puede retrasar hasta 100μs después de que el borde principal del pulso de entrada pase el umbral de entrada.

Un panel frontal examina los puntos de prueba para supervisar la linealidad (LG), tiempo entre la entrada y el principio de la conversión. Las conversiones se pueden permitir/inhabilitar o desbloquear/bloquear en cualquier momento durante el intervalo de entrada.

Para el modo de coincidencia, la conversión se inicia en el análisis de voltaje por la caída del pico de un pulso aplicado.

El modelo 8701 tiene en un panel frontal, varios ajustes, con destornillador multi- vuelta, potenciómetros para el control de niveles bajos y también los altos, así como ajuste del cero. El modelo 8701 proporciona las conexiones requeridas para el uso con la mayoría de los amplificadores que realizan el rechazo de los pulsos de atropellamiento y permiten hacer correcciones por tiempo vivo.

[3] Entradas:

- CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL (ADC)- Acepta pulsos unipolares positivo o bipolares para análisis PHA y SVA; amplitud 0 a +10 V, +12 máximo de V; tiempo de subida 0.25 a 100μs máximo; anchura 0.5μs mínimo; Z_{in} = 5 kΩ, acoplamiento directo; panel frontal BNC.
- PUERTA - Acepta un pulso positivo lógico o un nivel dc; valor alto ≥+2.5 V; valor bajo ≤400 mV, 0 a +7V máximo; dc acoplado; la carga es de 27 kΩ a +5 V; la COINCIDENCIA seleccionada es 27 k hasta -12 V.
- TIEMPO MUERTO – El conector situado en el reverso del panel BNC recibe una ENTRADA externa de tiempo muerto. Acepta una señal negativa o positiva lógica.
- Se puede tener acceso a la señal horaria compuesta de tiempo muerto por medio del pin 6 del panel de reverso del conector de DATOS. El enchufe de puente interno selecciona la señal de salida, positivo verdadero o negativo verdadero; transportado en la posición NEG; TTL compatible con 4.7 k Ω a +5 V.

[4] Salidas:

- DATOS- Proporciona 13 líneas de salida compatibles binarias TTL y la transferencia de datos ordena los requerimientos para la interfaz MCA; panel reverso cable conector de 34-pin. Las líneas de datos son negativas verdaderas. Las líneas de entrada también son proporcionadas por el estabilizador digital corrector de voltajes modelo 8233. El rango de control del estabilizador; cero: ± 2%, ganancia ± 5%.
- RECHAZO DE ATROPELLAMIENTO /CORRECTOR DEL TIEMPO VIVO- Acepta rechazo y señales de tiempo vivo desde equipos amplificadores con PUR/LTC. También está provisto de una PUERTA LINEAL.
- RECHAZO- Recibe un pulso positivo verdadero lógico usado para iniciar una secuencia de rechazo ADC; Linear Gate (LG) ADC; amplitud ≥2,5 ó 7 V de máximo, anchura≥10ns, carga 22KΩ a 12 V. Accesible a través del pasador 2 de la parte posterior del panel conector PUR.

- LG- Provista de una señal lógica verdadera negativa. La señal lógica baja mientras el ADC rechaza un pulso de entrada y vuelve a subir en función del pulso adquirido. Salida compatible TTL, resistencia en serie de 47 Ω . Accesible a través de un pasador 1 en la parte posterior del panel conector PUR. La señal LG puede verse en el panel principal (INSP) Inspección del punto de prueba, verdad positiva, resistencia en serie de 220Ω.

[5] Parte frontal del panel de control.

- GANANCIA- interruptor rotativo de seis posiciones: 256, 512, 1024, 2048, 4096 y 8192 canales para unos pulsos o niveles de 10 V.
- COMPENSACIÓN –Interruptor rotativo de seis posiciones: 256, 512, 1024, 2048, 4096 y 8192 canales
- RANGO- Seis interruptores para desplazar digitalmente el espectro a la izquierda, desde 0 a 8064 canales en canales múltiplos binarios de 128.
- LLD- Mediante el ajuste de un potenciómetro multi-vuelta accionado por un destornillador se selecciona el nivel inferior de voltaje aceptado como mínimo de entrada; rango 0,02 a +10 Vdc. El umbral de entrada rastrea el LLD a 100mV.
- ULD- Mediante el ajuste de un potenciómetro multi-vuelta accionado mediante un destornillador se selecciona el nivel superior del voltaje aceptado como máximo de entrada; rango entre 0,02 a +10,5 V dc.
- ZERO- Mediante el ajuste por multi-vuelta del destornillador el potenciómetro se pone en el nivel de entrada cero, ajustando el rango ± 5 % de la escala de rango completa ADC.
- DETECCIÓN DE PICOS. Interruptores para seleccionar la conversión del ciclo inicial AUTO (Automático) o DELAYED (Retardado). Durante una fracción constante el pulso de entrada cae cuando está en automático. El selector interno opera automáticamente cuando cae el pulso de entrada. En el modo retardado, el convertidor empieza de forma retardada, iniciada por la señal de entrada a través del umbral de ajuste. El ajuste del potenciómetro permite seleccionar un retraso de 2 a 100μs. La inspección del punto de prueba controla el tiempo de retraso lineal ajustado en la puerta, positiva verdadera, resistencia en serie de 200 Ω.
- COINCIDENCIA/ANTICOINCIDENCIA- Interruptor para selección de coincidencia y anticoincidencia. El modo coincidencia (COIN) con un pulso positivo en puertas permite inutilizar la conversión de entrada.

[6] Indicadores:

- TIEMPO MUERTO- 20 segmentos indicadores LED muestran el tiempo medio muerto del convertidor.

[7] Funcionamiento:

- NO LINEALIDAD INTEGRAL-<±0,025% de la completa sobre el exceso de 99,5 % de la gama seleccionada.
- DIFERENCIA NO LINEAL- <±0,7% sobre el exceso 99,5% del rango incluyendo los efectos integrales no lineales.
- GANANCIA DE FLUJO-<±0,009% de la escala completa/ºC
- FLUJO CERO- <±0,0025% de la escala completa/ºC
- LONGITUD DEL FLUJO TÉRMICO-<± 0,005% de la escala completa/24 horas a temperatura constante.
- PICO DE FLUJO- 0,0025% de la escala completa para 100KHz.
- CONVERSIÓN DEL TIEMPO-1,5μs+0,01(N+x) μs donde N = Cuenta dirección, y x = Compensación digital efectiva.
- PERFIL DEL CANAL. Típicamente más del 90 % de anchura de canal.

[8] POTENCIA REQUERIDA.

- +24v-75mA
- -24V-75mA
- +12v-150mA
- -12V-150mA

[9] Datos físicos:

- TAMAÑO- Enchufe entandar NIM módulo 3,42x22,12 cm por DOE/ER-00457T
- PESO NETO- 0,9 Kg
- PESO TRANSPORTE- 1,8Kg

6.2.6. Contenedor ORTEC modelo 4001A.

El contenedor ORTEC 4001A y de 4001C NIM acomoda cualquier módulo de equipo que se haya fabricado a los estándares de NIM según lo definido en DOE/ER-0457T. Los módulos se construyen con rejillas cableadas para asegurar la ventilación de los instrumentos funcionando en el recinto. Las guías ajuste-libre del módulo son superiores a los requisitos especificados en DOE/ER-0457T.

Estas guías de acero tienen un revestimiento de níquel pulido que garantizan una baja fricción. Las placas laterales se pintan con una aleación de aluminio para asegurar la protección de las mismas

El contenedor ORTEC 4001A distribuye toda la corriente continua. y niveles de la alterna de la fuente de alimentación a los conectadores del módulo a través de un arnés de cableado.

Los módulos de 4001A NIM se pueden usar como compartimientos separados para ser utilizados con las fuentes de alimentación existentes. Los compartimientos de NIM incorporan los soportes necesarios para el montaje del contenedor.

- Montaje y distribución de energía para los módulos estándares de NIM
- Compatible con las fuentes de alimentación del compartimiento 4002A, de 4002D, y de 4002E NIM
- Construcción ajuste-libre del compartimiento
- Especificaciones recomendadas DOE/ER-0457T
- Baja-impedancia, barra de distribución, distribución de energía con el 4001C.

[1] Módulos de conexión.

- 12 módulos según lo especificado por DOE/ER-0457T.

[2] Instalación de conectores.

- Todos los conectores alámbricos en paralelo para +12 V, - 12 V, +24 V, - 24 V, +6 V, - 6 V, conexión a tierra, 117 V de ca, conforme con las asignaciones del DOE/ER-0457T. Conector de interfaz según los requisitos de DOE/ER-0457T.

[3] Panel de control.

- Panel de control con interruptor on/off., lámpara indicadora de potencia, piloto para la fuente de alimentación. El piloto se ilumina cuando la temperatura de funcionamiento se acerca al límite del diseño. Existen puntos de prueba de voltaje para la supervisión de las salidas de la fuente de alimentación.

[4] Construcción.

- Placas laterales de aleación de aluminio con las empuñaduras níquel-cromo en los salientes de montaje del panel. Los miembros superiores e inferiores son soldaduras de barras de acero de alta resistencia a tracción, construidas de níquel. La placa posterior del conectador es de acero tratado con cadmio.

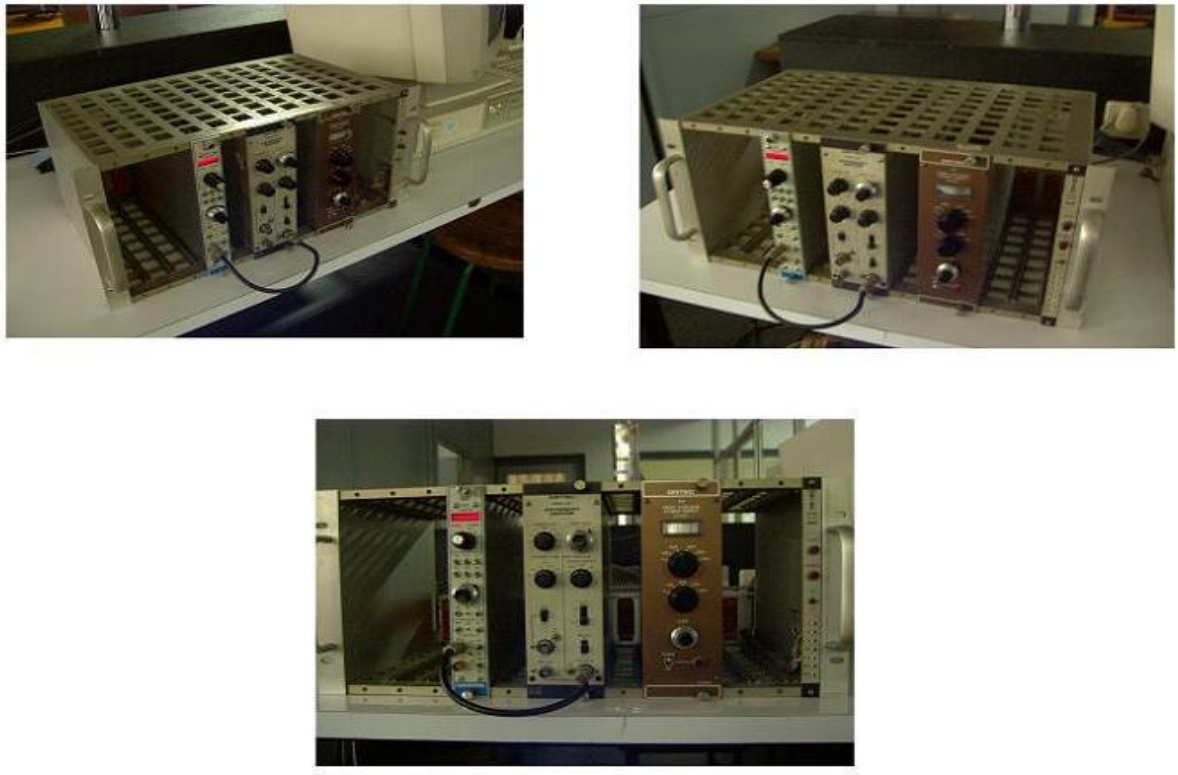
6.2.7. Analizador multicanal Canberra 100.

En el sistema analizador multicanal Canberra 100 destaca una única ranura en el circuito con un canal de 16k por 32 bit en memoria y un microprocesador de 16 bit revisado por un bus de datos de 16 bit.

El sistema 100MCA de Canberra se usa con un convertidor analógico digital (ADCs) y módulos multicanales escalados (MCS).

- Analizador multicanal integrado/ ordenador personal
- MCA; ISA bus o Micro canal bus
- 4096,8192 o 16384 canales de datos, memoria de 32-bit
- Extensible hasta cuatro 4 sistema 100 tabla por ordenador
- Ratón/ tablero de operación con menús despegables en windows
- Modos operativos PHA y MCS.
- Modo demostración lineal y logarítmico con auto-escalamiento
- Calibración de energía con primer y segundo orden
- Funciones de transferencia y de superposición.
- Pico central, FWHM y FWTM
- Útiles de impresión y dibujo.

En la siguiente fotografía se observa el conjunto modular de fuente de alimentación, convertidor analógico digital y amplificador.



Fotografía 6. Fuente de alimentación, amplificador, convertidor analógico digital y analizador multicanal.

6.2.8. Software System 100.

El sistema utilizado para recoger, manipular inicialmente y guardar los registros es el System 100.

Sin embargo, para el tratamiento de los datos, por las características de los registros, se han utilizado los programas de MATLAB y EXCEL.

Las características más destacadas del programa utilizado se enuncian a continuación.

El software System 100 A admite escalas lineles y logarítmicas con autoescala, calibración de la energía de primer y segundo orden, e información de pico (centro, FWHM y FWTM).

MICROPROCESADOR

- SISTEMA 100(VERSIÓN ISA BUS)- Microprocesador intel 80186 16-bit, 8 MHz,

MCA/TARJETA DE MEMORIA:

- MEMORIA- 16384 canales de memoria de datos, 232 cuentas por canal. Configurable como 16384, 8192 o 4096 canales completos de memoria, divisibles por 2, 4, 8 y 16
- PHA-Tiempo vivo o tiempo verdadero desde 1 a 107 s en incrementos de 1.0 s.
- PHA+M/R- Piggy- back, es capaz de independizar el tiempo vivo y el tiempo verdadero predeterminado sobre entradas individuales.
- MCS-Alberga tiempos desde 10μs a 900s por canal, número de barridos de 1 a 109.
- Exactitud de la base de tiempo PHA- Con 0.05%, cristal controlado.
- TIEMPO DE CICLO- Menos de 3μs(promedio).

INTERFACES:

- TIPO- Acceso directo a la memoria (DMA).
- PHA- Compatible.
- MIXTO/ROUTER- Modelo 1520 integrado ADC-Mixto/Router 100MHz x8K/16entradas, Tablero, control start /stop
- MCS-Compatible con Canberra el modelo 8082 NIM MCS

MCA SOFTWARE

- VFS- Escalas completas tanto logarítmicas como lineales (VFS) con autoescalado y control manual.

- RANGO VERTICAL- 64 a 4096 M(Lineal) en incrementos binarios, tres rangos logarítmicos adicionales con escala completa de 256K,16M, y 4096M.
- RANGOS HORIZONTALES- 256 a 16 K canales en incrementos binarios.
- REGION DE INTERES (ROI)-
- EXPANSION- pantalla de extensión horizontal para visualización de detalles; tamaño variable (Mínimo 64 canales)
- COMPARADOR- Pantalla de extensión horizontal de dos grupos cualquiera de memoria para comparación visual
- MENU BAR-La barra de menú desplegable permite tener acceso a menús secundarios y a Windows (archivo, edición, Lrn/Exec, E-cal, Análisis, y ayuda)

ANÁLISIS FUNCIONAL

- ENERGIA DE CALIBRACIÓN- Calibración de primer y segundo orden con la opción de unidades predefinidas (eV, keV, MeV.
- INTEGRAL-Calcula y muestra las cuentas totales incluyendo el fondo para el grupo de memoria corriente o la región de interés (ROI)
- AREA- Calcula y muestra las cuentas netas por encima del fondo y la estadística asociada (el error en %) para la región de interés (ROI)
- INFORMACIÓN DEL PICO- Calcula y muestra el FWHM, y FWTM del pico en canales.
- SUAVIZADO.- Media móvil de 3 o 5 puntos, mediante ecuaciones de la forma:
  - 3 puntos: $Y_i' = (Y_{i-1} + 2Y_i + Y_{i+1})/4$
  - 5 puntos: $Y_i' = (Y_{i-2} + 4Y_{i-1}\ 6Y_i + 4Y_{i+1} + Y_{i+2})/4$

6.2.9. Sistemas de control de área.

Se ha utilizado como elementos de control de área, un detector de neutrones y un detector de radiación gamma.

Fotografía 7. De Izda a dcha detector de neutrones y contador Geiger.

Fotografía 8. Medida de la radiación gamma y neutrónica ambiental.

6.3. Comprobación y calibración de la instrumentación.

En este apartado se exponen las tareas previas realizadas con los equipos para garantizar que están en disposición de medir eficazmente la radiación de una energía de 6128,63 keV, procedente del decaimiento del 16 N, que tiene lugar con una vida media de 7,13 s.

En concreto, el objetivo de las tareas que se exponen en este apartado, tuvieron como objetivo la comprobación del funcionamiento del amplificador y del convertidor analógico digital.

Se ha utilizado una fuente de cesio 137 que emite radiación gamma de una energía de 661 keV. Se han modificado los diferentes parámetros del amplificador, del convertidor analógico digital, y del ordenador, y se ha comprobado el correcto desplazamiento del canal del cesio 137. El detector se colocó aproximadamente a 1 m de la fuente, y no se modificó su posición durante todo el periodo de medidas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 165.

Amplificador		Convertidor analógico digital				Ordenador	Canal del cesio 137			
Ganancia gruesa	ganancia fina	Rango	Ganancia	Desplazamiento (offset)	Nivel mínimo de detección (LLD)	Memoria,	Centroide	Fwhm	Fwtm	Observaciones
5	8/50	8 K	8 K				482,08	72	122, 46	
		4 K	4 K		0	16 K	237	35	60, 98	
						4 K	236, 98	38, 57	72, 38	
		2 K	2 K			8 K	114,87	19, 17	34, 97	
		2 K	2 K	128						No se ve ningún pico
		8 K	8 K	128		8 K	348, 31	68, 28	112, 64	
		8 K	8 K	256		8 K	219, 13	68	122	
		8 K	8 K	256 más 128		8 K	90, 96	75, 66	151, 27	
		8 K	8 K	Cero	2/cero= 0,2					No sale pico. Se hacen cero los canales que van desde el 0 al 0,2 * 8000 =1600
		8 K	8 K		1/50= 0,15					No sale pico. Se hacen cero los canales entre cero y 0,15 = 1200
		8 K	8 K		1/cero = 0,10					No sale pico. Se hacen cero en los canales entre cero y 0,1 * 8000 = 800
		8 K	4 K	Cero	Cero		234,99	3006	46, 68	
		4 K	8 K				471, 64			Sólo mide hasta El canal 4000. El resto, hasta los 8 K salen cero
5	5/cero= 0,5	8 K	8 K	Cero	Cero		373, 13	108, 5		
5	6/cero = 0,6						412	34	74	
5	7/cero = 0,7						479	35	64	
5	8/cer = 0,8						548, 46	42, 22	72, 28	
5	9/cero = 0,9						615	46	81	
5	10/cero = 1						683	50	93	
5	11/0 = 1,1						750	55	101	
5	12/cero = 1,2						819	63	115	
5	13/cero = 1,3						887	68	126	
5	14/0 = 1,4						956	79, 45	138	
5	15/cero = 1,5						1023	83	148	
5	15/cero = 15	8K	8K				1026,46	83.57	151.2	
10	0,5						692	55,5	93	
10	10/0						1371			
10	1, 5						2046			
20	0,5						1384			
20	1,0						2731			
20	1, 5						4083			

Tabla 165. Parámetros de ajuste del equipo de detección y registro de la radiación.

Se deduce de las medidas que:

- El amplificador debe tener una ganancia gruesa lo más pequeña posible. Con una ganancia gruesa de 5, el canal correspondiente a la energía del Cesio es bajo, con lo que queda un amplio margen para medir la elevada energía de decaimiento del 16N. Al aumentar la ganancia gruesa se va desplazando hacia la derecha el canal del Cesio hasta alcanzar, como se ve en la tabla que con una ganancia del amplificador de 20, al Cesio le corresponde el canal 4083.
- La ganancia fina del amplificador, debe ser mínima, es decir, 0,5, lo que permite reducir el valor total de la amplificación: Si en el amplificador se utiliza una ganancia gruesa de 5, y una ganancia fina de 0,5, se está amplificando una cantidad que es el resultado de multiplicar la ganancia gruesa por la ganancia fina, es decir estaríamos utilizando en el caso del ejemplo una amplificación de 2,5. Al utilizar una u otra amplificación, se modifica el valor del último canal leído. Si queremos leer un número de canales muy alto, es decir energías muy altas, tendremos que utilizar la amplificación más pequeña posible.
- Conviene poner el rango y la ganancia del convertidor analógico digital en el valor máximo, 8K, pues poner un rango más pequeño, por ejemplo 4K, cuando la ganancia del convertidor es de 8 K, solo sirve para no contabilizar las cuentas que van entre los canales 4000 y 8000.
- El valor del offset puede ser cero. El offset del convertidor analógico digital desplaza el origen de los canales hacia la izquierda en un número equivalente al valor del offset. Por ello, el canal de la energía del Cesio con el convertidor analógico digital es:
    - 482 si el offset es 0,
    - 348 si el offset es 128 y
    - 219 si el offset es 256,
    - Y 90 si el offset es para las mismas ganancias del amplificador.
- El valor del nivel mínimo de detección del convertidor hace nulos los eventos medidos en los canales que van:
    - entre cero y
    - un número que es el resultado de multiplicar
        - la ganancia,
        - por un número cuya parte entera es cero y cuya parte decimal es el número superior que aparece en el mando circular, seguido de 2 dígitos que representan en número inferior del mando circular.

Como se ve en la tabla,

- con un LLD de 2/0, se anulan los canales menores de 8000*0,2 = 1600,
- con un LLD de 1/50, se anulan los canales menores de 8000 * 0,15 = 1200.
- Etc.

Es conveniente reducir a cero estos valores pues de esta manera destacan, porque se representan mejor en pantalla, las escasas cuentas, en proporción, que se producen en altas energías.

Una vez ajustados los parámetros generales del amplificador y del convertidor analógico digital, y su influencia en la posición en la que se encuentra el canal correspondiente a la energía del cesio 137, se debe calibrar el espectro para intentar expresar la relación que existe entre el número de canal y la energía de la radiación. Para ello se utilizaron fuentes de cesio 137 y de cobalto 60.

Los datos de estas fuentes radiactivas que se usarán para calibrar son los siguientes:

Cesio 137: vida media 30,17 años.

Energía keV	*intensidad absoluta*
32,1	6,3%
36,4	1, 2%
37,3	0, 29%
661	85%

Tabla 166. Características de la fuente de calibración de Cesio 137.

Cobalto 60: vida media 5,271 años.

energía	*intensidad absoluta*
1.173,2	100%
1.332,5	100%

Tabla 167. Características de la fuente de calibración de Cobalto 60.

Amplificador:		Convertidor analógico digital				Ordenador memoria	Datos de cesio 137			Datos del cobalto 60. Pico correspondiente 1173 keV			Datos del cobalto 60. Pico correspondiente a 332 keV			Última energía de alcance	Parámetros de calibración para la ecuación: Energía = A* canal2 + B* canal + C
Ganancia gruesa	Ganancia fina	rango	ganancia	Offset	LLD		centroide	FWHM	FWTM	centroide	FWHM	FWTM	Centroide	FWHM	fwtm		
Adquisición del espectro durante 180 segundos Posición del detector 1 m de distancia desde la fuente.																	
5	1	8 K	8 K	0	80	8 K	722,4	53,8	93	1244	70, 8	128, 9	1407	74,7	132, 6	8082, 4	A= 5.942e-6 B= 0.9675 C=-40.93
5	0,5	8	8	0	30	8	371,45	28,17	54,27	638,86	34,55	60,43	719.12	38,35	67,15	14646	A= -1.866e-5 B= 1.948 C=-59.96
5	1,5	8	8	0	100	8	1071			1850			2088			5758.7	A= 9,271e-6 B= 0,6301 C=-24.45
Como el ruido es demasiado intenso repetimos el proceso de calibración con el detector más alejado de la fuente Adquisición del espectro durante 180 segundos Posición del detector a 5,5 m desde el contenedor dela fuente.																	
5	1	8	8	0	100	8											No se localizan los picos
5	1	8	8	0	0,06	8	724,13			1250,21			1411,5			8175	A= 6,606 e-6 B= 0,9594 C=-38,94
5	1	8	8	0	0,06	8	723,86			1244,51			1409,6			7704	A= 4,306 e-6 B= 0,9834 C=-50,42
5	1	8	8	0	0,06	8	722,9			1246,21			1407,2			7840	A= -2,087e-6 B= 0,9802 C=-48,42

Tabla 168. Parámetros de calibración canales – energía.

En cualquier caso, se observa que:

- el parámetro A es muy pequeño, y que la expresión se ajusta, casi prácticamente a una ecuación lineal, en el que el coeficiente correspondiente al término lineal es casi 1. En consecuencia, la energía 6128 correspondiente al decaimiento del 16N estará prácticamente en torno al canal 6000.
- Que el fondo de escala para una ganancia del amplificador es 5 * 1 es del orden de 8000 keV, mientras que para una ganancia de 5 * 0,5 es de unos 14600 keV.

De todo lo visto en los puntos anteriores, se recomienda: que:

- Debemos operar con una ganancia total de 5 es decir ganancia gruesa de 5 y ganancia fina de 1. Esto lleva a tener el fondo de escala de la energía en 8000 keV aproximadamente.
- El rango y la ganancia del convertidor analógico digital debe ser de 8 K en ambos casos.
- El offset puede ser cero.
- El límite inferior de detección LLD debe eliminar los canales de baja energía.
- Como consecuencia de ello, el coeficiente lineal de la curva de calibración del número de canal, respecto al nivel de energía es prácticamente 1, y el término de segundo grado es prácticamente cero.

6.4. Conjunto de muestras analizadas.

Se han dispuesto muestras de distintas leyes, granulometrías y humedades para la realización de los ensayos, y se han agrupado en tres conjuntos.

[1] El primer conjunto de muestras se han recogido en distintos puntos de la planta de concentración una vez molido el mineral, y tienen un amplio abanico de leyes, como se ve en la Tabla 169. Se dispusieron las muestras en frascos de polipropileno y de polietileno de un volumen aproximado de 250 ml. Las leyes de las muestras son las siguientes:

Bote Polipropileno	Bote Polietileno	Peso muestras "		%F_2Ca
		tipo "A"	tipo "B	
1A	3B		303,953	4,20
2A	6B	303,347	311,397	27,85
3A	1B	295,545		36,75
4A	7B	298,885	294,415	61,83
5A	5B	312,026	293,922	74,33
6A	2B	305,992	313,280	87,02
7A	4B		317,179	97,20

Tabla 169. Contenido en F_2Ca de las primeras muestras.

[2] Se ha recogido un segundo grupo de muestras, las cuales se dispusieron, para los análisis, en botes de polietileno:

Muestra	Peso	Destilaciones				D. Media	Destilaciones_ CIM			D. Media	D. Definitivo
1A	257,1	3,84				3,84	3,38	3,51	3,54	3,84	3,49
1B	269,9	3,80	3,26	3,18		3,41	3,01	3,08	3,12	3,07	
1C	254,6	4,63	4,03			4,33	3,60	3,43	3,57	3,53	
1D	282,5	4,15				4,15	4,04	4,22	4,17	4,14	
1E	227,1	5,48	4,97	4,76		5,07	4,30	4,92	4,40	4,54	
2A	181,6	13,88	13,32	13,16		13,45	13,18	13,22	13,15	13,18	13,05
2B	223,9	16,68	16,48	16,09		16,42	16,08	16,10	16,18	16,12	
2C	166,7	16,09	15,86			15,98	15,99	15,93	15,88	15,93	17,63
2D	232,9	19,92	17,72	17,66		17,77	18,01	17,92	17,87	17,93	
3A	205,7	33,11				33,11	33,07	33,09	33,43	33,20	
3B	190,4	36,22	35,24	35,20	35,13	35,45	36,23	36,09	35,88	36,07	
3C	139,8	36,12	35,86			35,99	36,52	36,36	36,90	36,59	
3D	230,6	37,62	36,87			37,25	37,59	37,57	37,76	37,64	
3E	177,3	40,16	37,89			39,03	39,36	39,49	39,57	39,47	40,53
S-1		2,17	2,16	2,07		2,13	2,40	2,31		2,36	2,61
S-3							10,81	10,90		10,86	
S-7							54,32	53,80		54,06	55,13
4A	300,85						69,76	70,45		70,11	
4B							63,32	62,77		63,05	
4C	337,2						31,35	31,25		31,30	
4D							5,59	5.61		5,60	

Tabla 170. Segundo conjunto de muestras.

Estas muestras tienen la siguiente granulometría:

Muestras	Granulometría		
	> 150	> 230	< 230
1A	18,9	43,4	56,6
1B	17,5	42,1	57,9
1C	26,1	53,0	47,0
1D	21,0	46,2	53,8
1E	18,4	44,4	55,6
2A	0,8	4,0	96,0
2B	0,8	2,2	95,6
2C	0,8	3,6	96,4
2D		5,0	95,0
3A	14,4	38,0	62,0
3B	13,6	37,0	63,0
3C	13,4	36,8	63,2
3D	10,0	33,5	66,5
3E	8,5	31,4	68,6
S-1	21,6	31,8	68,2
S-2	19,8	32,0	68,0
S-3	26,0	36,0	64,0
S-7	24,6	36,0	64,0
S-8	22,6	35,8	64,2
4A	6,8	18,7	81,3
4B	8,8	19,7	80,3
4C	0,2	0,6	99,4
4D	0,5	1,3	98,7
		> 200	< 200

Tabla 171. Granulometría del segundo conjunto de muestras.

[3] El tercer conjunto de muestras poseen todas la misma ley y tienen distinta granulometría pues se han tomado a la entrada de los molinos de la instalación y se les ha molido en distintos molinos de laboratorio, por lo cual, la granulometría es diferente.

Denominación de la muestra de ley 33,53% en F_2Ca	Peso en gramos	Origen y características
gra	303,659	Entrada al molino. Original Húmeda 1,25% de agua
grb	346,36	Entrada molino. Original Seca
grc	367,83	Entrada de molino más molino de cilindros.
grd	297,895	Entrada al molino más Molino de muestras antiguo
gre	307,550	Entrada molinos más Molino de muestras nuevo

Tabla 172. Tercer conjunto de muestras.

6.5. Diseño, fabricación, procedimiento de operación y ensayos con el primer prototipo de analizador de fluorita.

El contenedor original de la fuente, así como el método de activación convencional tal como se ha indicado en el punto [3] del punto 6.2.1 no es válido en la activación de la fluorita por varias razones:

- El tamaño máximo de la muestra que permite el portamuestras es muy pequeño. Se prevé una escasa activación de la muestra, por lo que se presupone que el tamaño de la muestra ha de ser mayor que la capacidad de la ranura mayor.
- El pequeño tiempo de decaimiento del nitrógeno, 7,13s. producido por la irradiación del flúor obliga a que la lectura de la emisión gamma producida por la muestra irradiada sea inmediatamente después de finalizada la activación. Además, los primeros segundos después de la activación son fundamentales en el proceso, y es estrictamente necesario leer la radiación procedente de la muestra en este tiempo.
- el tiempo de demora de la lectura debe ser constante en todos los experimentos, puesto que cualquier variación en la demora dará una diferencia de resultados que no correspondería a una variación de la ley.
- la precisión en la posición de la muestra en el estado de activación y de lectura debe ser controlada rigurosamente, para garantizar una representatividad de la medida.
- En el método de operación convencional descrito anteriormente, hay que simultáneamente:
  - extraer el tubo portafuente parcialmente,
  - extraer el tubo portamuestras,
  - extraer la muestra del tubo portamuestras y
  - llevar la muestra delante de un detector.

No se puede garantizar un periodo de tiempo constante para realizar esta operación.

Se precisa un modelo que:

i. disponga de un portamuestras de fácil, segura y exacta manipulación para
   - desplazar la muestra hasta situarla en el haz de neutrones,
   - dejar la muestra frente a la fuente para que sea activada,
   - desplazar la muestra en el mínimo tiempo posible, pero con exactitud.
   - El portamuestras debe permitir utilizar muestras de diversos pesos hasta unos 300 gramos.

ii. permita mantener constantemente un espesor de blindaje entre el operador y el haz de neutrones que equivalga al espesor del contenedor original, es decir, al menos 250 mm de parafina borada.

iii. Soporte el detector de INa en una posición fija próxima al contenedor de la fuente. El tiempo de semidesintegración del 16N, es de 7,13 s, por lo que

el tiempo transcurrido desde el final de la irradiación hasta el principio de la detección debe ser lo más reducido posible. En consecuencia, la distancia entre la posición de irradiación de la muestra y la posición de lectura del detector, debe ser lo más reducida posible.

iv. interponga entre el detector y el contenedor un blindaje para que la radiación directa de la fuente, que origina un ruido de fondo, no sea demasiado elevada.

Las opciones que se pueden contemplar son:

[1] modificar el contenedor original de forma que permita:

- incorporar un portamuestras de mayor tamaño, mecanizando un hueco realizado en el contenedor,
- acoplar el detector a una posición fija respecto a la fuente, para garantizar la precisión en el posicionamiento de la muestra.
- desplazar la muestra de forma muy rápida y fiable,

Las ventajas de esta opción son:

- La obra requerida es mínima.

Los inconvenientes son:

- No se puede mecanizar el contenedor con la fuente en su interior, por lo que habría que alojarla en un blindaje provisional.
- Modificaría definitivamente el contenedor, lo que no es aceptable.

Por estos inconvenientes, no se ha contemplado en ningún momento esta opción.

[2] realizar un complemento al contenedor original, situado en la parte superior del mismo, que permita:

- trabajar sin el portamuestras del contenedor original de la fuente.
- colocar, desplazar y exponer una muestra a la radiación de la fuente en las condiciones requeridas,
- incorporar una capa de blindaje para trabajar con seguridad sin la protección del portamuestras original.
- disponer de un sitio fijo y exacto para soportar el detector en este complemento.

Las ventajas de esta opción son:

- No hay que modificar el contenedor original, solo hacerle una adaptación que se coloca en la parte superior.

- No es necesario manipular la fuente más que como en una operación estándar.
- Los materiales necesarios son fácilmente obtenibles y la construcción de este diseño es sencilla.

Sin embargo tiene como inconveniente:

La distancia entre la posición de la fuente, y la posición de la muestra aumenta, pues en el portamuestras original, la fuente podría estar a varios centímetros de la muestra y en el caso del adaptador, la fuente estará al menos a 460 mm de distancia (ver Figura 442). Esto supone que se reduce considerablemente el flujo de neutrones que inciden en la muestra y por ello la activación es mucho menor. Según los cálculos previos realizados, es posible que la activación del flúor sea muy reducida.

[3] realizar un nuevo contenedor, que dispusiera de los requisitos precisos para llevar a cabo la activación según las premisas fijadas. Las ventajas son obvias, sin embargo tiene como inconveniente la necesidad de manipular la fuente extrayéndola del contenedor original para llevarla a este nuevo contenedor.

A la vista de las tres opciones mencionadas se prefirió llevar a cabo la [2] por:

- sencillez,
- porque permitía hacer fácil y rápidamente los primeros ensayos y
- porque en el caso de que la activación de la muestra fuera insuficiente, al reducirse considerablemente el flujo de neutrones, permitía convertir, con una modificación este contenedor en el contenedor ideal en la tercera opción.

En consecuencia, se llevó a cabo esta segunda opción pero se previó que en el caso de que la activación no fuera suficiente se pudiera reconvertir el conjunto según la tercera opción. El hecho de que la activación no fuera suficiente se traduciría en un número de cuentas bajo de la muestra activada e indistinguible de la lectura en ausencia de muestra.

A continuación, se describe detalladamente el primer prototipo construido y los ensayos de laboratorio realizados con él. Se corrobora que el flujo de neutrones es insuficiente y se describe el nuevo diseño y la construcción del segundo prototipo. Se exponen los resultados conseguidos con este nuevo prototipo. Estos resultados demuestran la correlación existente entre la lectura realizada y la ley en flúor de la muestra, así como la influencia de diversos parámetros.

A la vista de estos resultados satisfactorios, se ha podido redactar y solicitar una patente solicitada por el autor de esta Tesis Doctoral. Finalmente, se propone una realización de la patente que reúne las características extraídas en las experimentaciones.

En todos los casos, el curso de la exposición discurrirá, como se ha hecho ya anteriormente, desde una descripción geométrica hasta una

exposición de la operación con el mencionado prototipo finalizando en una crítica del mismo.

6.5.1. Descripción del primer prototipo.

El primer prototipo consta de:

- Un conjunto de acero inoxidable, como el representado en el bloque 1 y 2 de la Figura 445.
- Dos portamuestras iguales también de acero inoxidable, representados igualmente en el bloque 3 de la misma figura.

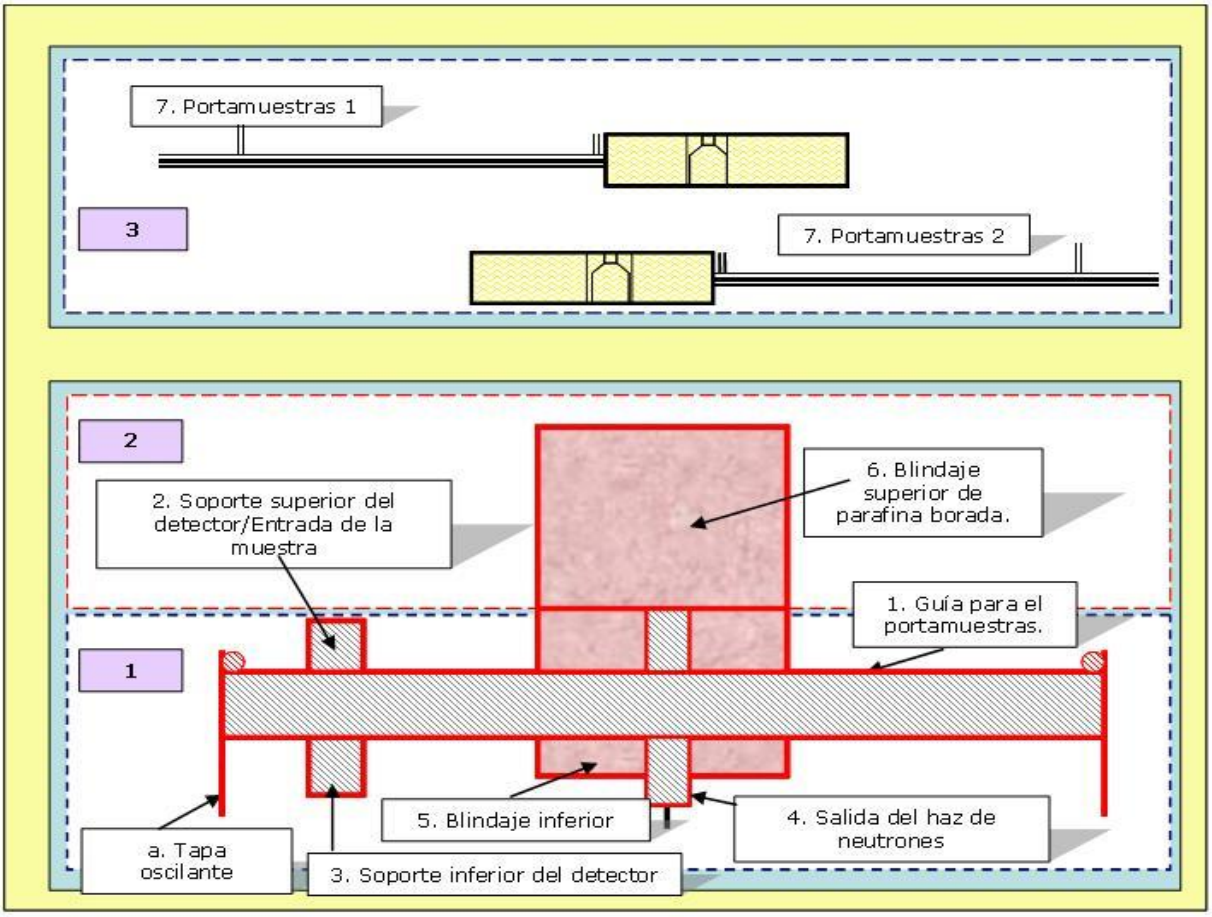


Figura 445. Primer prototipo.

En el bloque 1, que es el más complejo, se aprecian varios elementos cuyas denominaciones y objetivos son los siguientes:

- 1. Guía hueca para el portamuestras, de sección cuadrada, con:
  - a. dos placas oscilantes en cada extremo, que, en su apertura, permiten la entrada del portamuestras, y, en posición de cierre sirven

de referencia en el movimiento del portamuestras.

- 2. Un soporte superior para el detector que puede servir también para la introducción de la muestra en el portamuestras.
- 3. Un soporte para el detector realizado en la parte inferior del portamuestras, en una posición colineal con el anterior.
- 4. Un tubo que permite la salida del haz de neutrones del contenedor original de la fuente.
- 5. Blindaje inferior, de acero, de sección circular, relleno de parafina borada, que está atravesado por el portamuestras mencionado anteriormente.

En el bloque 2 se encuentra el

- 6. Blindaje superior de acero inoxidable, relleno de parafina borada, que cierra e impide la salida de neutrones por la parte superior protegiendo de esta manera al operador.

Las ventajas de hacer el bloque 1 y 2 independientes son las siguientes:

- El peso. La manipulación es más sencilla de esta manera ya que el peso es bastante elevado, y es necesario colocar los bloques con precisión sobre el contenedor original de la fuente.
- La facilidad de la alineación y de su comprobación, ya que, a través de la parte superior del tubo del bloque 1 se visualiza el tubo del portamuestras del contenedor original. Como es obvio, esta operación debe realizarse con el portafuentes retraído como en la Fotografía 3.

En el bloque 3, se observan

- 7. dos portamuestras de acero, que son dos cajas abiertas por su parte superior para facilitar el llenado con parafina borada, excepto en la parte central donde hay un tubo que permite alojar al contenedor de la muestra.

Bajo el espacio a ocupar por el contenedor de la muestra se ha perforado en la chapa de acero un orificio circular con dimensiones ligeramente inferiores a las del bote contenedor de la muestra. El objetivo es evitar la atenuación de la radiación procedente de la fuente, y de la radiación procedente de la muestra irradiada que le dificultara llegar hasta el detector. En la Figura 445 se observan igualmente que el portamuestras tiene una barra, que permite al operador mover el portamuestras dentro de la guía entre dos posiciones límites que vienen definidas por el contacto entre unos topes realizados en la barra, y la placa oscilante.

El diseño detallado del prototipo se muestra en la Figura 446.

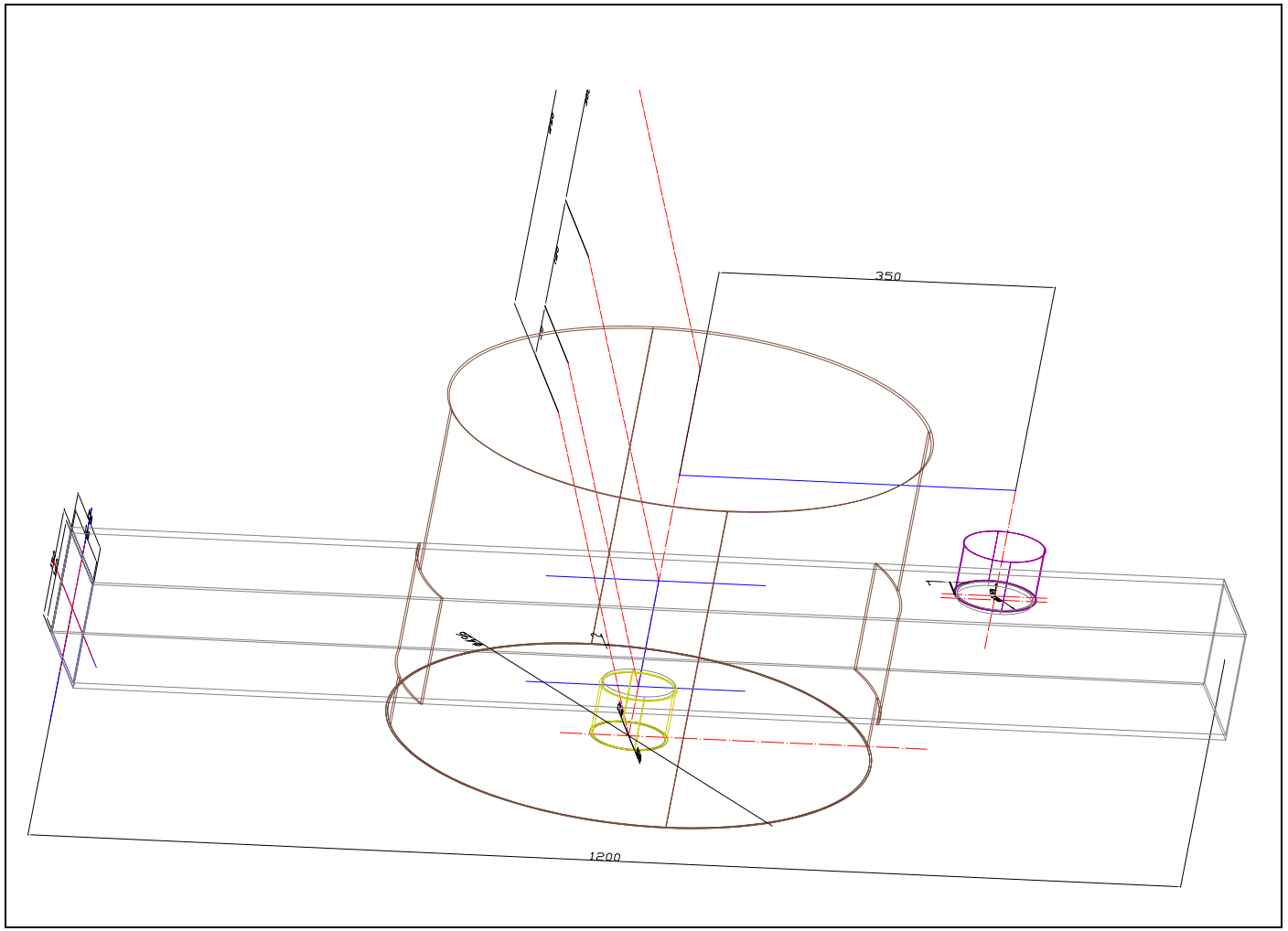
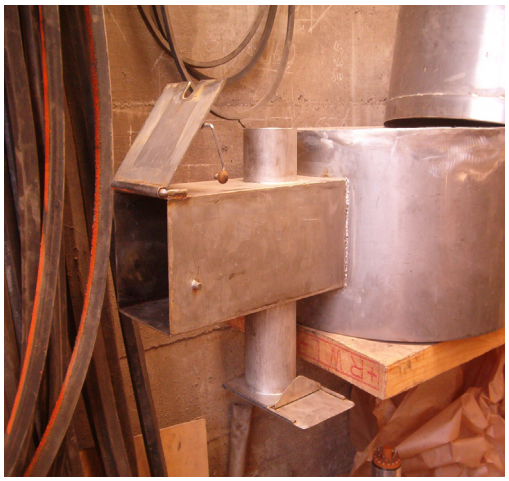


Figura 446. Diseño detallado del primer prototipo

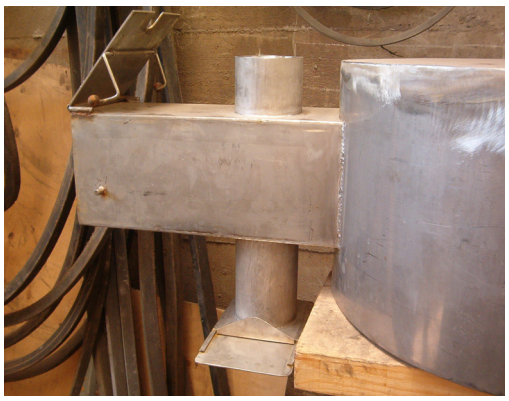
6.5.2. Fabricación del primer prototipo.

La parafina se adquirió en placas y el boro en forma de ácido bórico, en polvo. Para llevar a cabo el relleno, se fundió la parafina y se realizó una mezcla homogénea de un 5% aprox. de ácido bórico.

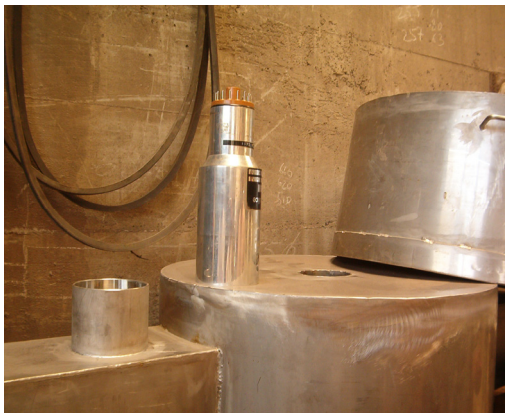
En las fotografías siguientes se observan distintas fases del proceso de fabricación del primer prototipo, así como el aspecto del blindaje inferior con el hueco y el soporte para el detector y para la entrada de las muestras en el portamuestras.



Fotografía 9. Blindaje inferior. Detalle de la guía del portamuestras y de los soportes del detector. La placa oscilante, que en la fotografía está abierta, hace de tope de referencia en el desplazamiento del portamuestras.



Fotografía 10. Blindaje inferior.



Fotografía 11. Blindaje inferior y vista parcial del blindaje superior.

Fotografía 12. Blindaje inferior, y vista parcial del blindaje superior. El detector puede colocarse en este soporte superior, aunque realmente en el diseño se prevé que esta zona se pueda introducir la muestra directamente en el portamuestras.

Fotografía 13. Guía del portamuestras del lado del detector. Detector en su soporte. La lámina deslizante hace de soporte del detector.

Fotografía 14. Blindajes superior e inferior con la guía para el portamuestras por el lado opuesto al detector. En principio, sobre este lado se podía poner otro detector.

Fotografía 15. Tapa superior del blindaje inferior. En su centro se aloja la muestra en la momento de la irradiación.

Fotografía 16. Portamuestras. Se rellena todo el hueco de parafina. En la parte central, se introduce la muestra. Por la parte inferior de la muestra se ha retirado la chapa de acero para una mayor penetración de los neutrones en la muestra y para que los rayos gamma derivados del decaimiento del Nitrógeno lleguen fácilmente al detector, sin atenuación.

Fotografía 17. Detalle de los portamuestras con la barra para desplazarlos dentro de la guía.

Fotografía 18. Detalle de los portamuestras.

Fotografía 19. Interior de la guía para el portamuestras del blindaje inferior. El hueco bajo la muestra en el portamuestras, coincide con un hueco en el blindaje inferior para una mejor activación de la muestra.

Fotografía 20. Conjunto del blindaje inferior con la guía y el blindaje superior tal como se montarán encima del contenedor original de la fuente. Vista desde el lado opuesto al detector.

Fotografía 21. Conjunto del blindaje inferior con la guía del portamuestras y el blindaje superior tal como se montarán encima del contenedor original de la fuente. Vista desde el lado del detector.

Fotografía 22. Vista del conjunto en el taller donde se fabricó.

Fotografía 23. Vista del blindaje inferior invertido. La parte superior es la que quedará en contacto con el contenedor original de la fuente de neutrones.

Fotografía 26. Blindaje superior antes de rellenarse con parafina borada.

Fotografía 24. Vista inferior del blindaje inferior antes de rellenarse con parafina borada.

Fotografía 27. Placas de parafina.

Fotografía 25. Vista inferior del blindaje inferior antes de rellenarse con parafina borada.

Fotografía 28. Pesado de la placa de parafina.

Fotografía 29. Preparación de parafina en trozos antes de fundirla.

Fotografía 30. Pesado de los trozos de parafina.

Fotografía 31. Trozos de parafina dispuestos para fundirse..

Fotografía 32. En una primera idea, para reducir el tiempo necesario de fusión de la parafina, se pensó en fragmentarla en una trituradora de mandíbulas. El sistema era demasiado lento, por lo que se desechó la idea.

Fotografía 33. Fragmentos de parafina fundiendo directamente en el blindaje superior.

Fotografía 34. Parafina fundiendo sobre planchas eléctricas.

Fotografía 35. Parafina fundiendo en el portamuestras directamente.

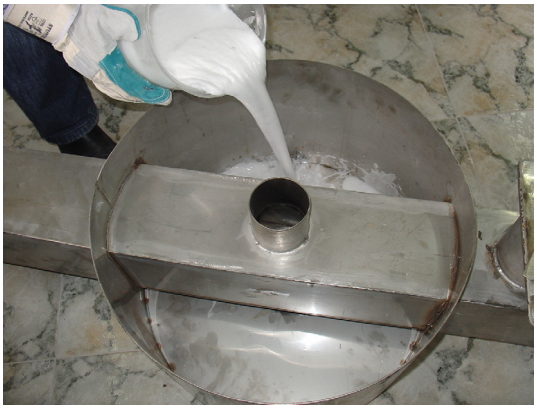
Fotografía 36. Parafina fundiendo en estufas.

Fotografía 37. Parafina fundiendo en placas y estufas eléctricas.

Fotografía 38. Mezcla de la parafina y el boro con un agitador.

Fotografía 39. Mezcla de la parafina y el boro con un agitador.

Fotografía 40. Mezcla de la parafina y el boro con un agitador.



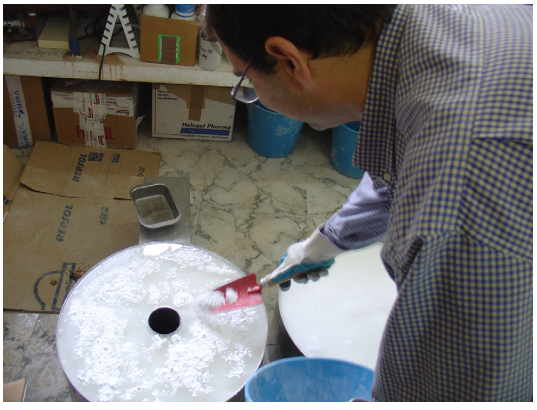
Fotografía 41. Vertido de la parafina en el blindaje inferior.

Fotografía 42. Vertido de la parafina.

Fotografía 43. Durante el enfriamiento de la parafina se produce una decantación del ácido bórico.

Fotografía 44. Para evitar la decantación del ácido bórico, se agita durante el enfriamiento de la parafina.

Fotografía 45. Al finalizar el vertido en el blindaje superior, se añade ácido bórico para compensar la posible decantación del mismo.



Fotografía 46. Finalización del vertido de parafina en el blindaje inferior.

Fotografía 47. Vertido final de ácido bórico en el blindaje inferior. Por la parte hueca central entran los neutrones y alcanzan la muestra.

Fotografía 48. Los dos blindajes rellenos de parafina borada.

Fotografía 49. Al finalizar el vertido y producirse el enfriamiento, se produce un rechupe que es necesario compensar incorporando nuevas mezclas.

6.5.3. Procedimiento de operación.

En primer lugar hay que montar el prototipo sobre el contenedor original de la fuente.

El proceso de montaje del conjunto es el siguiente:

- Se retira la tapa del contenedor original.
- se retira el portafuentes a su posición de retraído.
- Se extrae el portamuestras.
- Se coloca el bloque 1 poniendo cuidado en su centrado.
- Se coloca el bloque 2.
- Se coloca el portafuentes a su posición centrada.
- Se sujeta el detector.
- Se conectan todos los elementos.

Tras este montaje el prototipo queda de la siguiente manera como se ve en la figura:

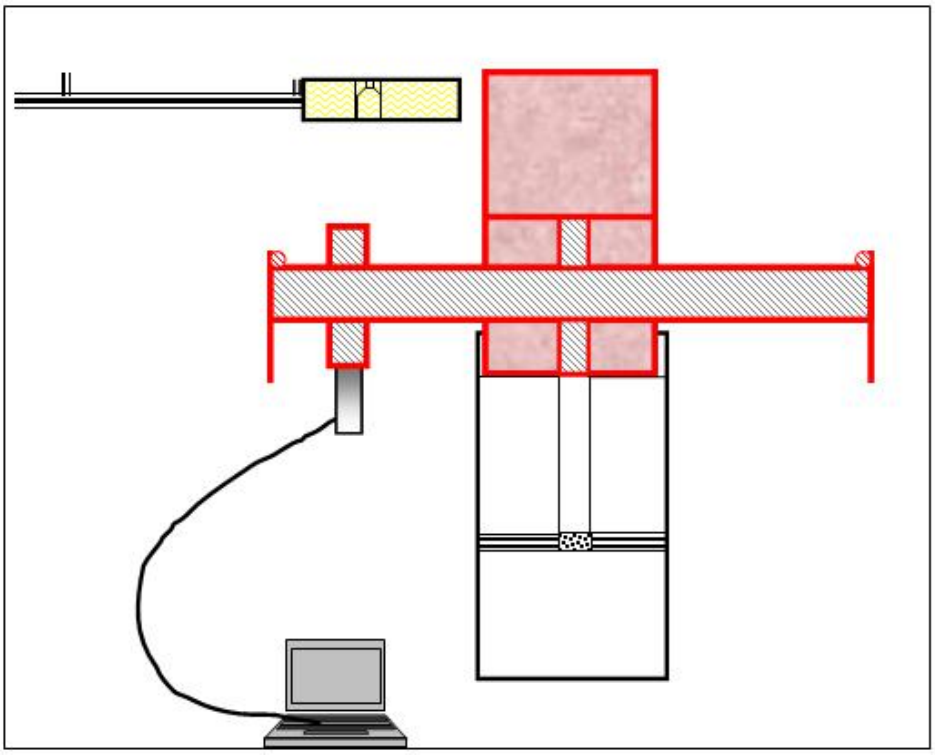


Figura 447. Disposición del prototipo 1 en posición de medida.

El procedimiento de operación tiene varias fases:

- Colocación del contenedor de la muestra en el portamuestras Ver Figura 448.

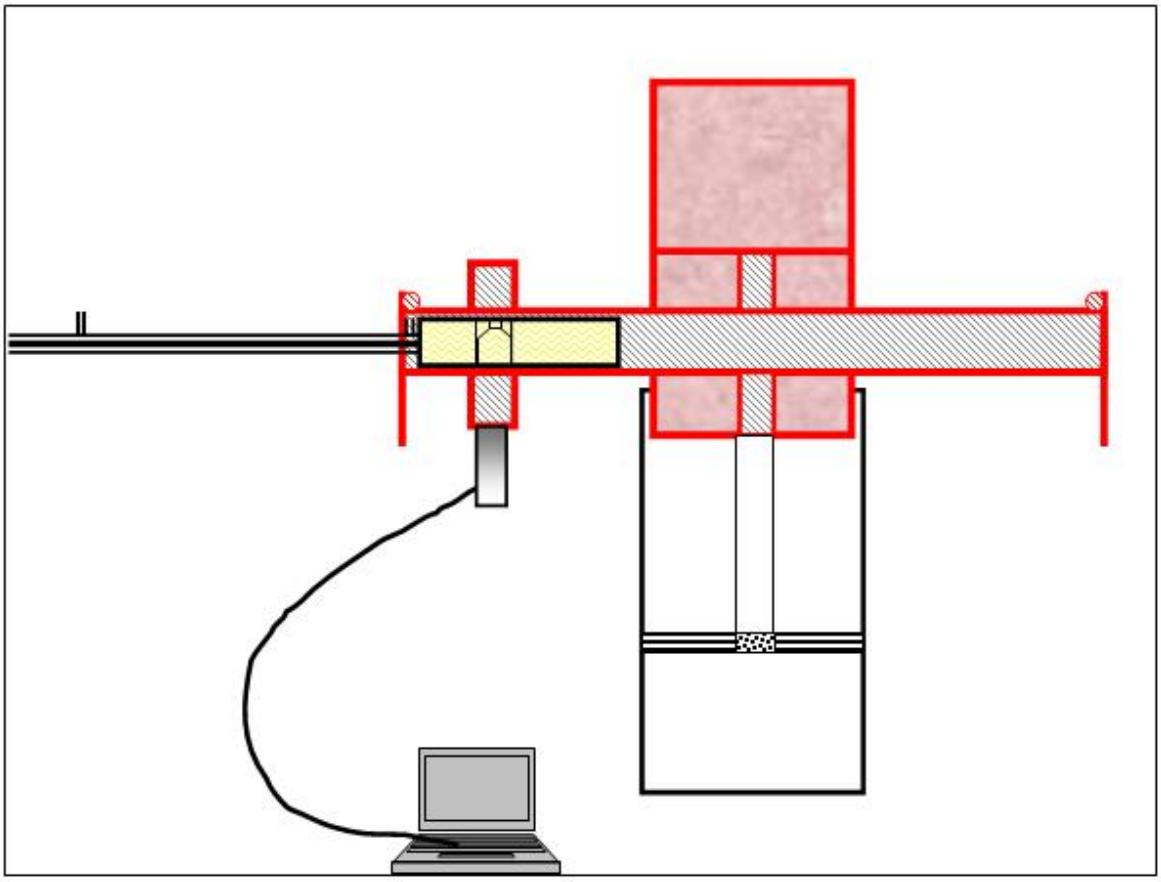


Figura 448. Posición en situación de introducción de la muestra y de medida de la muestra irradiada.

- Introducción del contenedor de la muestra en el portamuestras.
- Colocación del portamuestras en la guía. (También se puede colocar el contenedor de la muestra una vez colocado el portamuestras en la guía. En este caso se hace a través de la apertura superior (ver Fotografía 13).
- Desplazamiento del portamuestras hasta llegar a la posición de irradiación. Para ello se desplaza el portamuestras por el interior de la guía hasta que la muestra esté situada frente a la fuente de neutrones. En esta situación el tope del portamuestras indica que está en posición de irradiación.

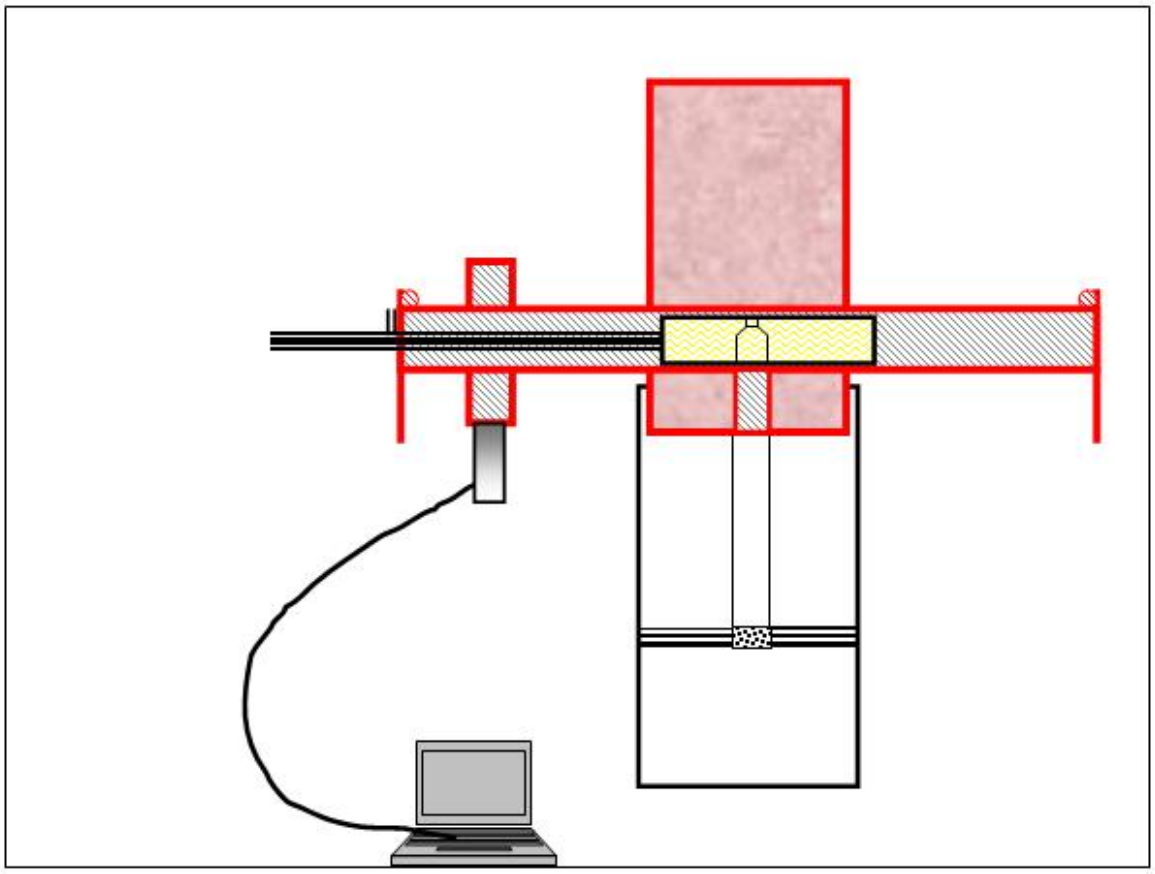


Figura 449. Posición en situación de irradiación.

- Irradiación de la muestra. La muestra permanece frente a la fuente durante un tiempo que se denomina tiempo de activación o de irradiación.
- Desplazamiento de la muestra hasta ser situada frente al detector. El límite de este desplazamiento viene indicado por el contacto entre el tope de la barra del portamuestras, contra la placa oscilante, como está en la Figura 448. Esta operación tiene que llevar un tiempo mínimo, fijo y exacto para todas las medidas.
- Lectura de la muestra irradiada.

La idea de tener dos portamuestras iguales se debe a:

- Blindar la salida de neutrones a través de la guía por el lado opuesto al de operación.
- Utilizar el segundo portamuestras para bloquear el haz de neutrones a través del tubo cuando se extrae el portamuestras de uso.
- Utilizar el segundo portamuestras en casos especiales en los que falle el primer portamuestras, o se quiera trabajar en serie con dos portamuestras, etc.

El desplazamiento del portamuestras se puede completar con un sistema de desplazamiento automático, con control tanto informático como eléctrico, etc., y ejecutadas con distintos tipos de actuadores neumáticos, manuales, etc., pero en los ensayos se ha llevado a cabo de forma manual.

6.5.4. Ensayos con el primer prototipo.

Se han realizado medidas con este primer prototipo siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

En el Anexo *"Relación de archivos de datos tomados en el laboratorio", s*e hace un listado de los archivos grabados en el laboratorio. Los archivos se distribuyen según sean fondos o muestras activadas, y tienen una referencia numerada, que va escrita entre llaves {}.

De aquí en adelante, los valores obtenidos y reflejados en las distintas tablas, se siguen por la referencia del archivo del que se han tomado. A partir de esta referencia en el listado del citado apéndice se puede encontrar el nombre del archivo y las características de su adquisición.

Previo a cualquier ensayo de activación de las muestras, se ha comenzado por registrar las señales en ausencia de muestra activada. Se ha comprobado que, en estas circunstancias existen lecturas en el rango de energías mayores a 3 MeV. que llegan a alcanzar valores del orden de 2600-2700 cuentas en 180s. (14-15 cps). Tabla 173.

Cuentas por encima de 3000 keV	
fondo	***Muestra 7A***
2673{303}	2672 {9}
2615 {304}	2700 {10}
2682 {305}	2762 {11}
2698 {306}	2769 {12}
2694.{307}	2686 {13}
2591 {308}	2615 {14}
2769 {309}	2707 {15}
2651 {310}	2614
2814 {311}	2599 {16}
2684 {312}	
2662 {313}	
2708 {314}	
2723 {315}	
2711 {316}	
2578 {317}	
2743 {318}	
2594 {319}	
2606 {320}	
2594 {321}	
2722 {322}	

Tabla 173. Lecturas de fondo y activadas con el primer prototipo y con el detector en la posición de diseño.

Posteriormente se ha llevado a cabo la activación de la muestra 7A de fluorita del primer conjunto de muestras, que tiene una ley de 97,20% y, se ha descubierto que las lecturas en el rango de energías que se considera de interés, eran comparables en magnitud con las lecturas derivadas del fondo, 2700 cuentas en 180 s. (15 cps). Se activaron muestras con distintas leyes y los resultados eran todos ellos muy similares.

Ante esta situación quedó patente que la activación neutrónica de la fluorita, en la práctica, no era tan sobresaliente como para dar una señal fácilmente detectable con cualquier sistema de ejecución, y se pensó en optimizar al máximo todos los factores de influencia en la medida hasta encontrar el contraste buscado. Para ello, se ensayó con este prototipo hasta alcanzar unas conclusiones que permitieron fabricar un segundo prototipo.

El objetivo de estos ensayos preliminares consistía en buscar un sistema que permitiera reducir las lecturas obtenidas sin muestra y discriminar estas medidas con las lecturas con muestra activada.

En principio, después del estudio teórico realizado de los componentes de la muestra de fluorita, no se esperaba recibir señales en el intervalo de energías elevado, en ausencia de muestra activada. Incluso se había analizado bibliográficamente la cadena de desintegración de los elementos de la fuente, en concreto del Americio, y no se observaba ninguna emisión de rayos gamma de alta energía.

Solo se esperaba señales en energías altas originadas por la emisión de Rayos γ de alta energía debidos al decaimiento del 16N producido en la activación del flúor.

Por ello, en el diseño se había ubicado el detector considerando como criterio, únicamente, la minimización del tiempo de desplazamiento de la muestra dentro de su guía (punto 6.5 apartado iii página 345).

De todas formas se había previsto dejar una distancia entre el soporte del detector y el blindaje del prototipo por si era necesaria poner una pantalla de plomo.

Se plantearon los sucesivos interrogantes:

[1] ¿se deberían las lecturas a ruido electrónico o a fondo radiactivo?

Se planificaron experiencias para determinar este punto, que llevaron a la conclusión de que se debía a un fondo.

[2] En este caso, ¿de donde provenía este fondo?

En el apartado 7.2 se discute de donde proviene dicho fondo, y se concluye que se debe a la reacción de los rayos alfa producidos por el Americio con el Berilio, es decir, provienen de la misma fuente de neutrones.

[3] Entonces, ¿se pueden reducir dichas lecturas de fondo?

Se ha comprobado que es necesario introducir un blindaje para reducir las lecturas de fondo. En el apartado [9] se determina cual es la posición más adecuada del detector y el blindaje que es necesario poner para reducir estos valores.

[4] La siguiente pregunta es: ¿y con ese blindaje, se puede llegar a detectar la activación del flúor?

Se ha llegado a la conclusión de que, para detectar la activación del flúor es necesario incrementar el número de cuentas recogidas por el detector, para lo cual será necesario, entre otras cosas, modificar el primer prototipo y acercar la fuente y la muestra, hasta casi estar en contacto directo.

En consecuencia, se plantearon dos líneas paralelas de actuación, con dos objetivos claros:

- Reducir las cuentas leídas en ausencia de muestra activada.
- Aumentar las cuentas recogidas ante una muestra activada.

Respecto a la primera línea se planifican los estudios tendentes a:

- Identificar el origen de las señales, y
- evaluar
  - la influencia de la distancia entre el detector y la fuente,
  - las características más adecuadas del equipo de medida y registro, y
  - el espesor y las características de los posibles blindajes del detector, etc.

Respecto a la segunda línea, y en función de los resultados que se van obteniendo en la primera se plantea modificar el procedimiento de activación.

El planteamiento comienza por analizar las posibles causas de estas cuentas para así poder reducirlas. A continuación se describen los ensayos realizados tendentes a

- encontrar la posición y el blindaje más adecuado para el detector,
- evaluar el nivel de activación que se conseguía en la muestra de fluorita.
- Analizar el procedimiento más adecuado para que la activación sea máxima.

Los experimentos se plantean espontáneamente, a la vista de los resultados que se recogen.

[1] Origen de la lectura en ausencia de muestra activada.

Cuando el detector se sitúa cerca del contenedor de la fuente, da una lectura que, en principio se puede pensar que se debe a:

- ruido electrónico del sistema de detección y registro, o bien
- a la presencia de una radiación en torno al detector.

El ruido electrónico tiene carácter aleatorio, mientras que la radiación proveniente de una fuente debe disminuir al aumentar la distancia a la misma según una ley conocida. Por lo tanto, para comprobar el origen de estas lecturas, se han hecho una serie de ensayos que intentan ver la evolución de la señal en relación con la distancia.

Los ensayos consistieron en alejar el detector de la fuente una distancia determinada, múltiplo de 33 cm, con la ventana de lectura del detector frente al prototipo, y medir el número de cuentas que se producen por encima de 3000

keV, exactamente 2996,5, durante un amplio tiempo de lectura (180 s).

De los resultados, que se expresan en la Tabla 174 y se reflejan en la Figura 450 , se dedujo instantáneamente, que las lecturas no seguían una ley aleatoria.

Distancia fuente detector variable, Tiempo de lectura 180 s Lectura entre 2996,5 y 7007,6	
Espaciamiento fuente detector	***cuentas por encima de 3000 keV***
Detector al lado del contenedor original,	69002
1*33 = 33 cm {288}	12920
2*33 = 66 cm {289}	5768
3*33 = 99 cm {290}	3055
4*33 = 132 cm {291}	1662
5*33 = 165 cm {292}	1186
6*33 = 198 cm {293}	753
7*33 = 231 cm {294}	638
8*33 = 264 cm {295}	602
9*33 = 297 cm {296}	493
10*33 = 330 cm {297}	427
11*33 = 363 cm {298}	368
12*33 = 396 cm {299}	329
13*33 = 429 cm {300}	299
14*33 = 462 cm {301}	253

Tabla 174.Influencia de la distancia fuente detector con el prototipo 1. Lectura de fondo.

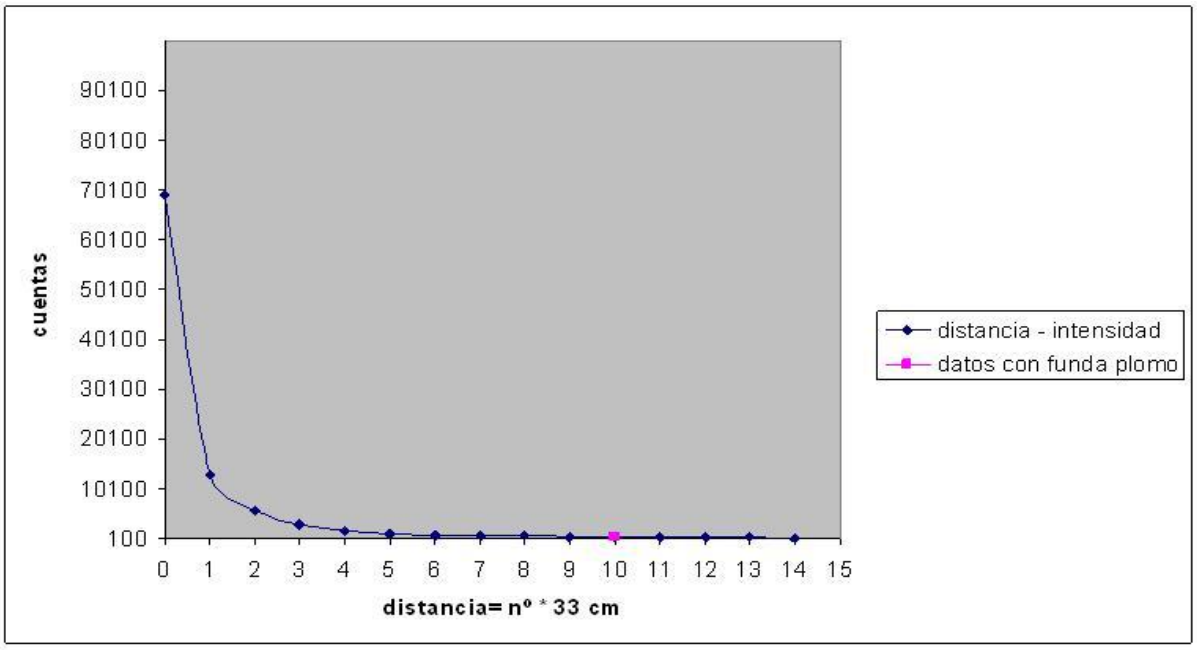


Figura 450. Gráfica intensidad distancia.

Como consecuencia, se desecha la posibilidad de que la señal sea ruido electrónico, y se establece la hipótesis de que su origen es la radiación proveniente del contenedor de la fuente ya que sigue una ley que es una función

decreciente respecto a la distancia al contenedor de la fuente, según una relación del tipo $f(1/d^2)$.

En resumen, la lectura del equipo de registro es una señal de fondo radiactivo originado por la fuente, y por ello, esta señal puede ser reducida con los dos elementos convencionales de blindaje:

- alejar el detector, lo cual supone la introducción de errores en la manipulación de la muestra,
- e intercalar entre la fuente y el detector algún sistema de blindaje.

En el punto 7.2 se analiza más detalladamente esta conclusión.

[2] Aislamiento del detector.

Con la posición del detector a 10* 33 = 330 cm respecto al contenedor de la fuente, se midió el fondo colocando sobre el detector una funda de plomo y se comprobó que la lectura realizada durante un periodo de 180s. se reducía desde 427 {297}, (valor leído sin funda), hasta 315, 326, 324 y 347 cuentas en cuatro medidas distintas en el rango de energías analizado.

[3] Se ha considerado colocar el detector en la posición más alejada respecto a la fuente, según la Tabla 174 (14*33 = 462 cm), en la cual la señal del fondo es de 253 cuentas en 180 s. ¿qué señal obtendríamos con una muestra activada?

Con este fondo, se realizó una medida de la muestra de alto contenido en fluorita, activada durante 120 s. El tiempo de lectura fue de 180 s en el intervalo de energía de más de 3000 keV y se obtuvo un valor de 172 cuentas {1} y 179 {2}, incluso menor que el valor de fondo (253 cuentas en 180s).

Se interpretó este hecho, como debido al error originado por la distancia entre el punto de irradiación y de lectura, que ocasionaba una demora elevada y variable del tiempo de iniciación de la lectura. Este tiempo era necesario para extraer la muestra del portamuestras y colocarlo frente al detector.

[4] Orientación del detector

Se subió el nivel inferior del rango de energías, y se giró el detector hasta dejarlo en posición opuesta a la situación anterior, (posición inversa), es decir, con la ventana de lectura orientada contraria a la posición del contenedor, y leyendo entre los canales 3996,7 y 7007,6 se obtuvieron unos valores de fondo con el mismo tiempo de lectura de 51, {323} y de 65 cuentas {324}, considerablemente menor que las anteriores.

Con ello se comprueba que no solo influye la distancia del detector sino la posición del mismo.

Con la muestra de fluorita 7A del primer conjunto de muestras, activada durante 2 minutos en esta posición del detector el número de cuentas fue de 72 {3}y 62 {4}.

Como en el caso anterior, el tiempo de lectura fue de 180 seg. (Tabla 175).

14* 33 cm. Posición inversa. Tiempo de activación 2 min Tiempo de lectura 180 s Lectura entre 3996,7 y 7007,6.	
Fondo	***muestra 7A activada***
51{323}	72 {3}
65 {324}	62 {4}

Tabla 175. Relación muestra activada/fondo en el primer prototipo. Tiempo de lectura 180 s, rango de energía amplio.

[5] Reducción del tiempo de lectura.

El tiempo de decaimiento del 16N es de 7,13 s. Es decir, en 7,13 s después de la irradiación, la actividad del N se ha reducido a la mitad. Se considera que el tiempo de lectura para muestras irradiadas de un valor de 180 s puede ser excesivo.

Por esto piensa en reducir el número de cuentas menos significativas reduciendo el tiempo de adquisición del espectro a 30 seg. en vez de 180s.

En la Tabla 176, se exponen los resultados de estas medidas.

Posición del detector 14*33 cm. Posición inversa Tiempo de activación 2 minutos Tiempo de lectura 30 seg. Intervalo de energías entre 3996,7 y 7007,6	
Fondo	***Muestra 7A activada***
16 {325}	18 {5}
12 {326}	
9{327}	
9 {328}	
7{329}	
10 {330}	
12 {331}	
13 {332}	
11 {333}	

Tabla 176. Relación muestra activada/fondo en el primer prototipo, con tiempo de lectura de 30 s. Rango energía amplio.

El número de cuentas de fondo se ha reducido, pero ante la muestra activada de fluorita de alta ley, no se aprecia diferencia de lectura. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en esta situación se dan varias causas de error importantes:

- La distancia elevada, unos 3 metros, entre el punto de activación de la muestra y el punto de posicionamiento del detector.
- El tiempo empleado en hacer este recorrido, inmediatamente después de la activación, es el tiempo en el que se produce una gran pérdida de la señal.
- La precisión en la colocación de la muestra o en la repetitividad de este tiempo es prácticamente nula.

[6] Reducción del intervalo de energías con muestras activadas.

Se hicieron nuevas medidas cerrando el espectro de energías para ajustarlo más a la energía procedente del 16N. Se busca, en consecuencia, los canales en los que el fondo sea menor y la señal mayor.

En principio, se piensa en medir en varios intervalos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El valor de la amplificación seleccionado inicialmente era el más adecuado porque nos permitía obtener con la máxima definición intervalos de cuentas que llegarían a valores de 8 o 9 MeV.

Con los dos valores de ampliación más bajos del equipo podríamos elegir entre un final de escala de 14 MeV o un final de escala de 8 MeV.

El valor de amplificación que daba un final de escala de 14 MeV no solo no aportaba nada a partir de los 8 MeV sino que:

- disminuía la definición del rango que realmente interesaba,
- además se eliminaban posibles cuentas que procediesen de la activación del oxigeno (valores superiores a 10MeV).

resultando por tanto que el final de escala de 8 MeV era claramente el adecuado,

- Se producía una reducción drástica de las cuentas de fondo a partir de valores de aproximadamente 3 o 4 MeV. Por debajo de estas energías se dan infinidad de fenómenos radiactivos naturales o derivados de la propia fuente.

De modo que es fácil concluir que las cuentas que aparecieran tras la activación del flúor a energías superiores a esos valores de corte, procederían claramente de la radiación del N16.

Con un tiempo de lectura de 25 seg. y un intervalo de medida entre 3996,7 y 7007,6 el resultado es el de Tabla 177.

Posición del detector 14*33 cm. Posición inversa Tiempo de activación 2 minutos Tiempo de lectura 25 seg. Intervalo de energías entre 3996,7 y 7007,6	
Fondo	**Muestra 7A activada**
6 {334}	15 {6}
11 {335}	11 {7}
11 {336}	13
9 {337}	
5 {338}	
6 {339}	
7 {340}	
7 {341}	
14 {342}	

Tabla 177. Relación muestra activada/fondo con tiempo de lectura de 25 s y rango de energías ancho.

En la Tabla 178, se muestran las medidas entre los canales 4500 y 6500. Se observa que la relación señal/fondo es más favorable para la detección.

Posición del detector 14*33 cm. Posición inversa Tiempo de activación 2 minutos Tiempo de lectura 30 seg. Intervalo de energías entre 4499,5 y 6502,5	
Fondo	**Muestra 7A activada**
10 {325}	17
7 {326}	16
3 {327}	14
4 {328}	12
4 {329}	16
8 {330}	15
9 {331}	16
5 {333}	14

Tabla 178. Relación muestra activada/fondo, tiempo de lectura 30 s y rango de energías estrecho.

Finalmente, en la Tabla 179 se muestran los resultados de la reducción del tiempo de lectura a 25 seg. y con medidas entre los canales 4499,5 y 6502,2 dando el siguiente resultado.

Posición del detector 14*33 cm. Posición inversa. Tiempo de activación 2 minutos Tiempo de lectura 25 seg. Intervalo de energías entre 4499,5 y 6502,5	
Fondo	**Muestra 7A activada**
3 {334}	10 {6}
5 {335}	6 {7}
10 {336}	6 {8}
6 {337}	
2 {338}	
2 {339}	
5 {340}	
5 {341}	
10 {342}	

Tabla 179. Relación de lectura/fondo con tiempo de lectura de 25 s y rango de energías estrecho

A la vista de los resultados obtuvimos las siguientes conclusiones:

- El ruido de fondo al lado del contenedor, es muy alto y se enmascara la señal, por lo que procedimos a alejar el detector de la fuente de irradiación.
- Medir la muestra de fluorita durante 180 s cuando los primeros momentos de decaimiento son tan significativos, también enmascara la señal, por lo que el tiempo de lectura se reduce a 25 s.
- El intervalo de medida para la muestra irradiada, en el que hay más señal abarca los canales 4500 a 6500.

[7] División en intervalos del espectro de energías.

A la vista de los resultados anteriores se pensó en sistematizar el análisis por fracciones del intervalo para comprobar si se producían mejoras en la correlación en algún de estos subintervalos de forma más destacable, o si la relación señal fondo mejoraba o empeoraba perceptiblemente en alguno de ellos.

En vista de la importancia de la amplitud del espectro, y para comprobar la correlación en distintos canales, se ha hecho lo siguiente:

- Con la posición del detector en 14*33 cm, y en situación inversa y
- dividiendo la segunda mitad del espectro de energía en seis intervalos:
  - Fracción 1 De 4500 a 5000
  - Fracción 2 De 5000 a 5500
  - Fracción 3 De 5500 a 6000
  - Fracción 4 De 6000 a 6500
  - Fracción 5 De 6500 a 7000
  - Fracción 6 De 7000 a 7500
- repetimos la secuencia activación y medida con la muestra de fluorita y
- midiendo durante 25 seg

obteniendo los siguientes resultados de la Tabla 180:

Posición del detector 14*33 cm. Posición inversa. Intervalo de energías entre 4499,5 y 6502,5														Act/fondo
FONDOS Tiempo de lectura 25 seg.							Muestra 7A activada Tiempo de activación 2 minutos Tiempo de lectura 25 seg.							
1	2	3	4	5	6	Total fondo	1	2	3	4	5	6	Total Activ.	
1	2	2	1	0	1	7 {347}	4	3	1	1	2	0	11 {18}	1,6
1	2	1	0	1	0	5 {348}	1	1	3	2	2	0	9 {19}	1,8
1	3	0	1	1	0	6 {349}	2	3	5	2	0	0	12 {20}	2
2	0	1	1	1	1	6 {350}	0	1	3	1	1	1	7 {21}	1,16
1	0	2	1	0	0	4 {354}	3	2	0	0	0	0	5 {25}	1,25

Tiempo de activación 9 minutos en las siguientes muestras:

FONDOS						Total fondo	Muestra 7A activada						Total Activ.	Act/fondo
1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		
1	1	3	2	1	0	8 {351}	2	3	2	0	2	1	10 {22}	1,25
1	1	0	0	0	1	3 {352}	2	3	0	2	0	0	7 {23}	2,3
1	1	1	0	3	0	6 {353}	1	3	0	0	5	0	9 {24}	1,5

Tabla 180. División en fracciones del intervalo de energías.

La lectura con la muestra activada es ligeramente mayor que el fondo, pero la precisión conseguida no es satisfactoria. Haciendo la relación act/ fondo para cada intervalo se observa que la mayor proporción se produce en el intervalo 3 en todos los ensayos (esto es previsible ya que las cuentas procedentes de la activación del flúor aparecerán con más frecuencia en torno al valor del pico de activación).

Hay que tener en cuenta para justificar el bajo valor de la relación señal ruido que el proceso consistía en extraer la muestra del portamuestras manualmente y llevarla hasta el detector alejado 14*33 cm, con lo que se perdían el valor más importante de cuentas .

[8] nuevo blindaje del detector.

Se han realizado varias pruebas para reducir el número de cuentas de fondo con el detector en 14*33 = 462 cm.y distintos blindajes:

- una manta de plomo sobre el detector
- una batería de plomo de automóvil, disponible en el laboratorio. Se utilizó la batería a falta de otro recurso más adecuado en ese momento, interpuesto frente al detector. En posteriores ensayos se usaron ladrillos de plomo.

Los resultados son los siguientes (Tabla 181):

Posición del detector y tipo de blindaje.	Rango entre 4500 y 7500 MeV dividido en 6 intervalos iguales.						Total
	1	2	3	4	5	6	
Fondo con el detector en el extremo del portamuestras {355}	30	21		1	15	8	121
Fondo con el detector en la posición prevista en el diseño.{356}	27	17	33	30	14	10	131
Fondo con el detector en el extremo del portam. con la manta de plomo sobre el detector {357}	23	20	27	19	15	10	114
Fondo con el detector en la posición anterior pero con dos mantas de plomo {358}	17	19	16	14	15	10	91
Fondo con el detector a 6 * 33 cm {359}	5	5	6	5	6	2	29
Fondo con el detector a 6*33 cm más bateria de plomo {360}	0	0	0	1	0	0	1
Fondo on la batería a 10 cm del detector {361}	0	1	6	3	1	0	11
Fondo con la bateria en contacto a 6*33 cm {362}	1	2	0	1	0	0	4
idem{363}	3	3	1	0	2	0	9
Idem {364}	2	3	1	0	0	0	6
{365}	2	1	2	0	1	1	7
{366}	2	3	2	0	2	1	10
{367}	3	4	0	2	0	0	9
Fondo con la bateria en contacto a 7*33 cm {368}	4	1	1	1	0	0	7
idem{369}	2	3	1	0	0	0	6
Fondo con el detector en la situación anterior y con una manta de plomo sobre el contenedor de la fuente {370}	2	0	2	5	0	1	10
Lectura de una muestra 7A activada con el detector en la posición anterior	2	3	2	2	1	0	10

Tabla 181. Medidas de fondo con blindajes adicionales y medida de una muestra activada.

Las primeras líneas de esta Tabla 181 indican que se ha reducido drásticamente las lecturas sobre los intervalos de energía del rango considerado, incluso estando el detector en una posición más cercana a la fuente.

La última línea expresa la lectura con una muestra de alta ley de fluorita que ha sido irradiada con la fuente de neutrones. Para hacer esta lectura se ha introducido la muestra en el portaguías por medio del soporte superior, y se ha desplazado el mismo hasta que la muestra se ha situado frente a la fuente. Posteriormente se ha irradiado durante 1 minuto y se ha retirado la muestra por el mismo hueco y rápidamente se ha desplazado los 231 cm hasta llevarla frente al detector. La lectura reflejada no muestra diferencia con la lectura de fondo.

En este punto de la investigación, en el que ya se ha reducido considerablemente la señal procedente del fondo, observamos que la respuesta de una muestra de fluorita activada de alta ley (97,20% en fluorita) no es muy diferente de la señal de fondo.

Esta falta de respuesta en dicha situación solo puede ser debida a:

- el tiempo necesario para el traslado de la fuente es tan elevado que se reduce prácticamente toda la emisión del 16N.
- El flujo de neutrones que llega a la muestra es escaso, debido a la distancia a la que se encuentran, (460 mm, tal como se indicó en el apartado 6.5, punto [2], en relación con los inconvenientes), y la activación de la fluorita es muy escasa por lo que la producción de 16N es muy pequeña.

Por ello se hizo necesario realizar las siguientes y concluyentes pruebas:

[9] Minimizar distancia fuente-muestra, acercar y blindar el detector.

Para evitar el error de manipulación al tener que extraer la muestra del portamuestras y llevarla a cierta distancia hasta el detector, se ha buscado la forma de colocar el detector próximo a la guía y aislarlo convenientemente para reducir el fondo.

A través de diversas pruebas en distintos lugares y con ayuda de blindajes de plomo, se consiguió ubicar el detector a una distancia lo suficientemente cercana para que el tiempo de desplazamiento de la muestra fuera mínimo, pero lo suficientemente protegida de la radiación directa para que el fondo fuera insignificante. Las Figura 451 y Figura 452 reflejan esta disposición.

Por otra parte, dado que la activación de la muestra de fluorita era pequeña, a causa del flujo de neutrones que alcanzaban la muestra, se quiso comprobar si en contacto directo fuente muestra, se produciría la suficiente activación. En caso de no ser así llegaríamos a la conclusión de que la activación era imposible con una fuente de 1 Ci.

El procedimiento que se planificó fue el siguiente:

- Se colocó el contenedor de la muestra en el extremo de un tubo relleno de parafina y se fijó de una manera sólida para que no pudiera desprenderse. Este conjunto se iba a introducir por el interior del contenedor original, en el espacio ocupado por el original tubo portamuestras, para activar la muestra al tiempo que se impedía la salida de neutrones.
- Se retiró el portafuentes a su posición de retraído.
- Se retiró el blindaje superior. En esta posición, al estar retraída la fuente, los operadores estaban protegidos.
- Se introdujo la muestra por el interior del blindaje superior del prototipo y del contenedor original de la fuente.
- Se desplazó la fuente para producir la activación del flúor.
- La activación se hizo en dos posiciones:

- Figura 451. Contacto lateral. En esta situación la muestra se encuentra a una cierta distancia de la fuente, ya que la fuente no se sitúa en el extremo del tubo portafuentes, sino que hay una cierta protección de parafina de unos 7 cm.
- Figura 452. Contacto inferior. En esta situación la muestra queda directamente sobre la fuente de neutrones.

En cualquiera de los casos durante la irradiación se impide la salida de neutrones por la presencia de parafina borada del tubo soporte del contenedor de la muestra.

- Se extrajo la muestra después del periodo de irradiación, y se colocó delante del detector. Esta operación sigue adoleciendo de la precisión necesaria en un ensayo riguroso..
- En el mismo instante, se volvió a desplazar la fuente a su posición retraída.
- Se midió durante el tiempo de lectura.

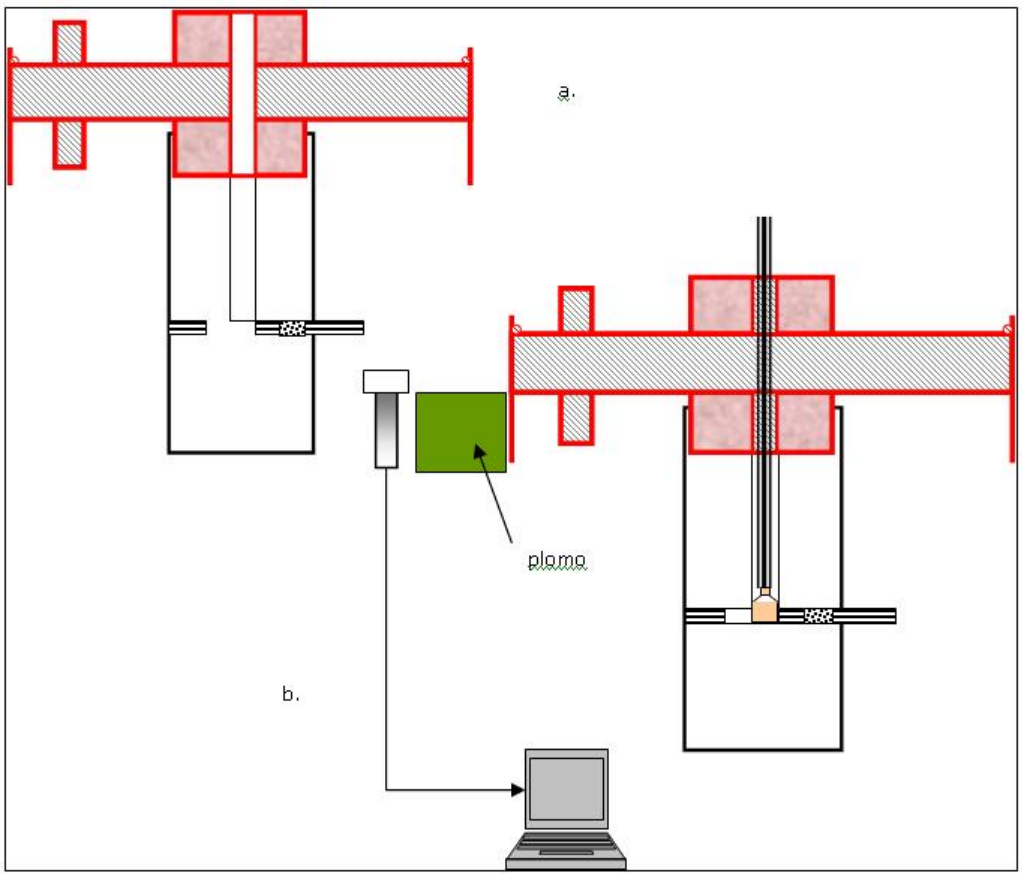


Figura 451. Contenedor con la fuente en las posiciones: retraída, para introducir la muestra (a) y de irradiación de la muestra por contacto lateral con la fuente (b).

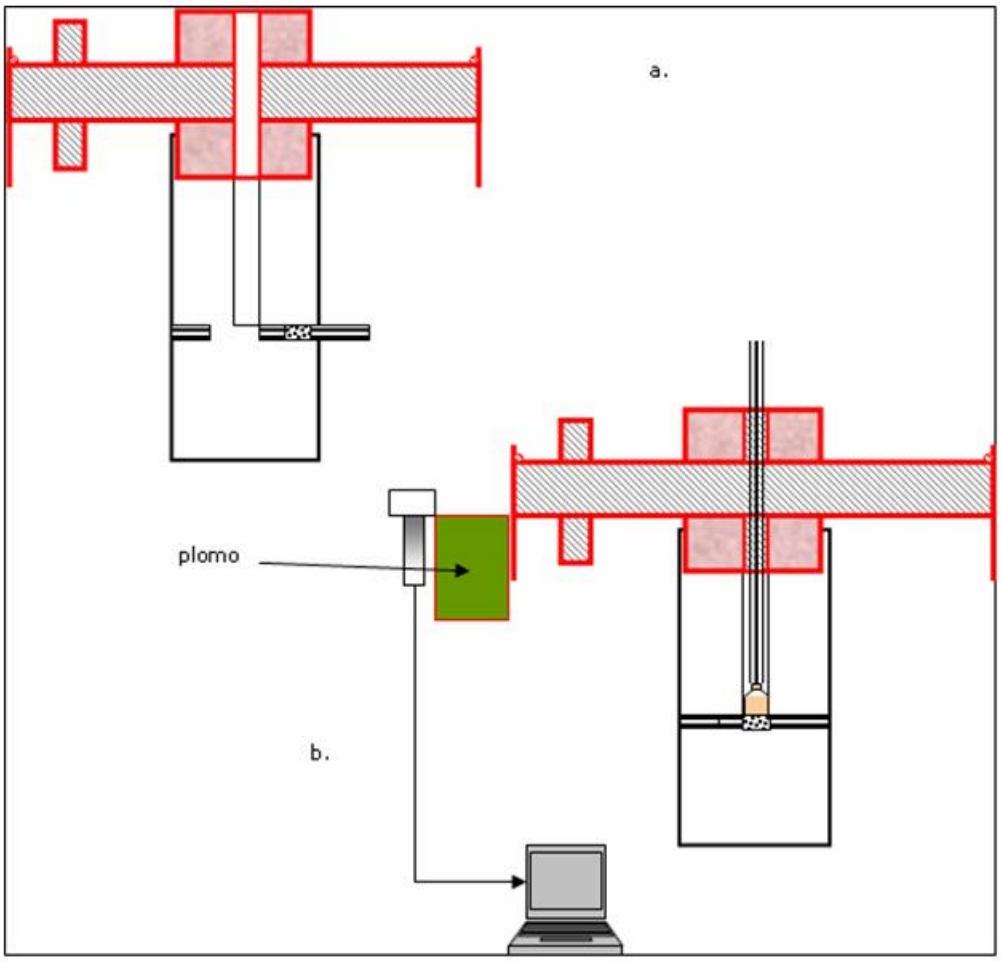


Figura 452. Contenedor con la fuente en las posiciones: retraída para introducir la muestra (a) y de irradiación de la muestra por contacto inferior directo (b).

En resumen, todas estas operaciones tienen los siguientes objetivos:

- Primer objetivo: el detector tenía que estar cerca del contenedor para no emplear tiempo en desplazar la muestra lo que lleva irremediablemente a prescindir de las cuentas realizadas en los primeros segundos, que son las más importantes.
- Segundo objetivo: había que blindar perfectamente el detector, y a la vista de que el mandil de plomo era absolutamente insuficiente, se tenía que usar la batería de plomo.
- Tercer objetivo: Había que mejorar la activación, para lo que se preparó un dispositivo de sujeción de la muestra, se eliminó la tapa superior del conjunto del portamuestras y se activó en contacto con la fuente.

Las condiciones generales de estas nuevas medidas, así como sus valores que se obtuvieron se observan en la Tabla 182 (fondos).

Detector colocado en un soporte tubular en las proximidades del prototipo. Batería de plomo en contacto con el detector 2 mantas de plomo frente al contenedor.							
Situación	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***Total***
Fondo con el detector en soporte a 33 cm del prototipo{371}	9	19	19	12	7	1	67
Fondo con el detector a 66 cm. del prototipo {372}	6	9	4	0	2	3	24

Tabla 182. Medidas de fondo con el detector con blindajes adicionales.

Y en la Tabla 183 (muestra activada).

Detector colocado en un soporte tubular en las proximidades del prototipo a 66 cm del prototipo. Muestra con la varilla de parafina borada. Activación en el interior del contenedor original. Batería de plomo en contacto con el detector 2 mantas de plomo frente al contenedor. Muestra 7A concentrado de fluorita: ley de 97,20%. Tiempo activación 120 s Tiempo de lectura 25 s.													
Posición	***fondo***						***Total***	***Muestra activada***						***Total***
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***		***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	
Contacto Lateral	11	7	3	2	2	1	26 {373}	18	13	7	8	5	1	62 {26}
	11	5	3	2	3	1	25 {374}	21	18	8	6	6	1	60 {27}
Contacto inferior	4	5	5	3	2	3	22 {375}	114	127	72	22	7	4	346 {28}
	3	7	7	3	1	4	25 {376}	114	142	53	18	5	1	333 {29}
	4	6	6	3	4	2	25 {377}	150	117	68	10	2	3	350 {30} 10 min activ
								113	116	69	16	10	3	327 {31} 50 min activ

Tabla 183. Medidas de la muestra de alta ley activada y del fondo con el primer prototipo modificado.

Por primera vez, se **comprueba que tiene lugar la activación y la detección de la misma**. Las lecturas de fondo son bajas, y las lecturas de las muestras activadas son considerablemente mayores.

Una vez en este punto, se preparó una muestra con una ley de 36,75% en fluorita para ver la diferencia de lecturas entre una muestra de alta ley y una de baja ley. La respuesta fue la siguiente (Tabla 184):

Detector colocado en un soporte tubular en las proximidades del prototipo. Muestra con la varilla de parafina borada. Activación en el interior del contenedor original. Batería de plomo en contacto con el detector 2 mantas de plomo frente al contenedor. Muestra de fluorita 3A del primer conjunto: ley de 36,75% Tiempo activación 120 s Tiempo de lectura 25 s.														
Posición	***fondo***						***Total***	***Muestra activada***						***Total***
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***		***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	
Contacto Inferior	7	6	0	8	0	1	22 {378}	43	50	24	8	2	2	129 {32}

Tabla 184. Medidas de la muestra de baja ley activada y del fondo con el primer prototipo modificado

En resumen, se consiguió obtener una respuesta **muy favorable** que promovió los siguientes ensayos.

6.5.5. Conclusiones de los ensayos con el primer prototipo y sus modificaciones.

En estos ensayos finalmente se ha conseguido que las lecturas de fondo sean lo suficientemente pequeñas, y se ha logrado activar adecuadamente la fluorita, de tal manera que las lecturas ante las muestras de fluorita activada destacan sobre las medidas del fondo, y son mayores cuanto mayor sea la ley.

En consecuencia, en este punto se pueden extraer las siguientes conclusiones que abren el camino para diseñar el nuevo prototipo.

- Se ha corroborado que la activación producida por la fuente de neutrones de 1 Ci. sobre el flúor de la muestra, es eficaz.
- El contacto entre la muestra y la fuente debe ser lo más estrecho posible para que la respuesta sea significativa. Incluso a poca distancia entre ambos, la sola presencia de un par de cm de parafina borada, reduce considerablemente la señal. Según aparece en las tablas anteriores 62 {26},60 {27}, cuentas frente a 346 {28},333 {29},350 {30}, 327 {31}, que se obtienen cuando la fuente está en contacto con la muestra.
- Después de varias pruebas, se ha mejorado considerablemente la relación señal – fondo.
- Se ha comprobado la proporcionalidad entre la ley de fluorita y la lectura realizada en las distintas fracciones del intervalo global de lectura. La media de las 4 medidas tomadas sobre la muestra de 97% de fluorita es 339. La correspondiente a la muestra de 36,7% es de 129. Se conserva la relación entre las leyes (2,64) y la relación entre las cuentas (2,63).
- El procedimiento empleado requiere una manipulación que no es lo suficientemente rigurosa, pudiendo

quedar el personal expuesto a la radiación directa de la fuente de neutrones al extraer la muestra si no hay suficiente sincronismo entre la retirada de la muestra y del portafuentes.

- Se requieren varias personas perfectamente sincronizadas para realizar las medidas: una en el sistema de registro, otra en la manipulación de la muestra, y otra en la retirada del tubo portafuentes.

En consecuencia, hay que rediseñar el conjunto con la siguiente condición:

[1] La muestra tiene que desplazarse, desde la posición de irradiación a la de lectura, pero tiene que quedar en contacto directo con la fuente en el momento de la irradiación.

[2] Es necesario disponer un blindaje de plomo suficiente para garantizar que la lectura de fondo sea mínima, y la relación señal/fondo sea máxima.

6.6. Diseño fabricación y ensayos con el segundo prototipo.

A la vista de los resultados anteriores, se han interrumpido los ensayos y se ha vuelto a diseñar el segundo prototipo teniendo en cuenta lo siguiente:

- Es imprescindible que la muestra y la fuente estén lo más cerca posible.
- Sería conveniente aprovechar al máximo el material del primer diseño, y fundamentalmente,
- Se debe prever un espacio para rodear al detector del espesor necesario de plomo.

Ello supuso:

- realizar modificaciones en el blindaje inferior del primer prototipo, que consistieron en la realización de un orificio horizontal en el mismo, bajo la guía del portamuestras para alojar a la fuente, (Figura 453). En realidad, este orificio es perpendicular, en planta, a la guía del portamuestras, aunque en el dibujo, por sencillez, se han dibujados paralelos. La realización en dirección perpendicular es por simplicidad, tanto en la ejecución del orificio como en el proceso de medidas. Para ello:
  - se vació el relleno de parafina de esta parte,
  - se taladraron las paredes del cilindro exterior,
  - se dispuso un tubo de metacrilato del tamaño del tubo portafuentes del contenedor original,
  - se rellenó de nuevo de parafina borada, siguiendo un proceso similar al del primer prototipo.

- construir un nuevo blindaje para colocar en la parte inferior, donde se encontraba anteriormente el contenedor original de la fuente.
- Trasladar la fuente de neutrones desde el contenedor original hasta su nueva ubicación. En esta situación la fuente queda en contacto con la muestra durante la activación.

Se ha reutilizado la mayor parte del material del primer prototipo de acero inoxidable.

Se consideró que el espacio entre el soporte de la muestra, y el blindaje inferior, -5 cm en la realidad-, (ver Figura 445) sería suficiente. Se dispusieron chapas de plomo recortadas del tamaño adecuado para forrar el soporte del detector, y conseguir de dicha manera la protección del blindaje respecto a la radiación gamma.

El diseño se muestra en la Figura 453 y en las Fotografía 50 a la Fotografía 51.

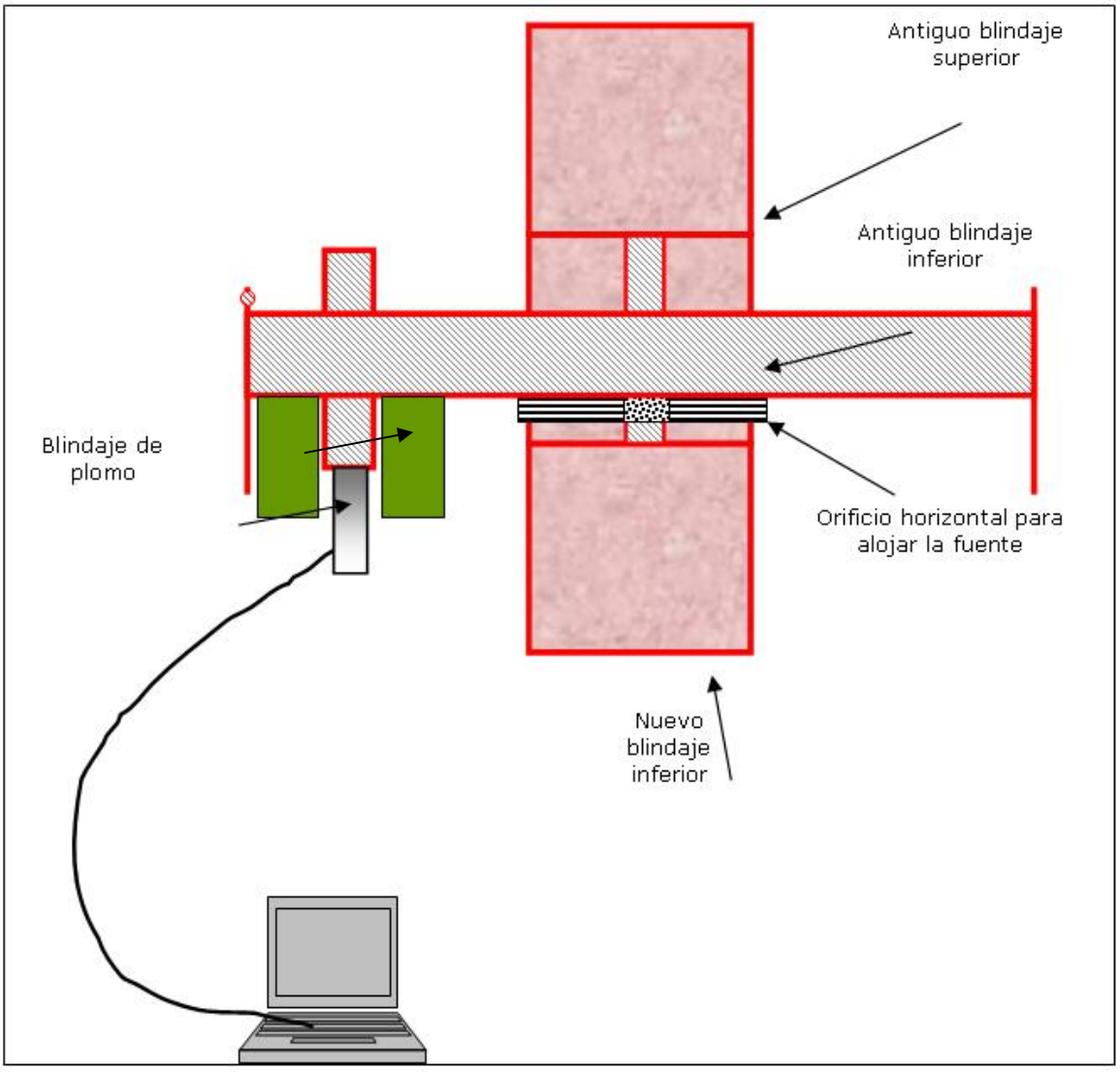


Figura 453. Segundo prototipo.

Fotografía 50. Aspecto del segundo prototipo. La manta azul es de plomo.

Fotografía 51. Vista de la nueva posición del tubo portafuente. Su dirección es perpendicular a la de la guía del portamuestras.

Para trasladar la fuente del contenedor original a su alojamiento en el segundo prototipo se tuvieron en cuenta todas las medidas de seguridad precisas.

- 1ª fase. Paso del tubo portafuente desde el contenedor original hasta un contenedor provisional de transporte.

Se construyó un contenedor provisional (Figura 454 y Figura 455), en el que se introdujo el tubo portafuentes según se estaba extrayendo de su contenedor original utlizando el sistema descrito en el punto [4] del apartado 6.2.1.

Figura 454. Contenedor provisional realizado para el desplazamiento de la fuente.

Figura 455. Contenedor abierto relleno de parafina.

El contenedor provisional es metálico, tiene forma prismática y está relleno de parafina borada, excepto en un tubo central horizontal que tiene las dimensiones precisas para alojar el tubo portafuentes.

- 2ª fase. Paso del tubo portafuente desde el contenedor de transporte hasta el orificio horizontal del antiguo blindaje inferior.

  Para introducir la fuente en el orificio realizado en el antiguo blindaje inferior, se utilizó el mismo procedimiento. Se colocaron alineados y en contacto los dos tubos, y se empujó por un extremo, y según iba saliendo del contenedor provisional, se introducía en el nuevo alojamiento.

Una vez la fuente en el nuevo prototipo, y con el detector en la ubicación prevista, se comenzaron los ensayos colocando láminas de plomo alrededor del soporte del detector.

Se comprobó que las láminas de plomo eran insuficientes, y que los niveles de lectura de fondo eran muy elevados. Se intentó blindar por distintos procedimientos, sin conseguir la reducción apreciable que se deseaba, hasta que finalmente se puso el detector en el extremo de la guía del portamuestras sujeto de un soporte construido artesanalmente.

Se colocó entre el detector y el contenedor una pantalla construida con ladrillos de plomo y a base de pruebas se consiguió eliminar las cuentas de fondo hasta dejarlas en un valor que se consideró razonable. En la Figura 456 se ha hecho un esquema del segundo prototipo modificado.

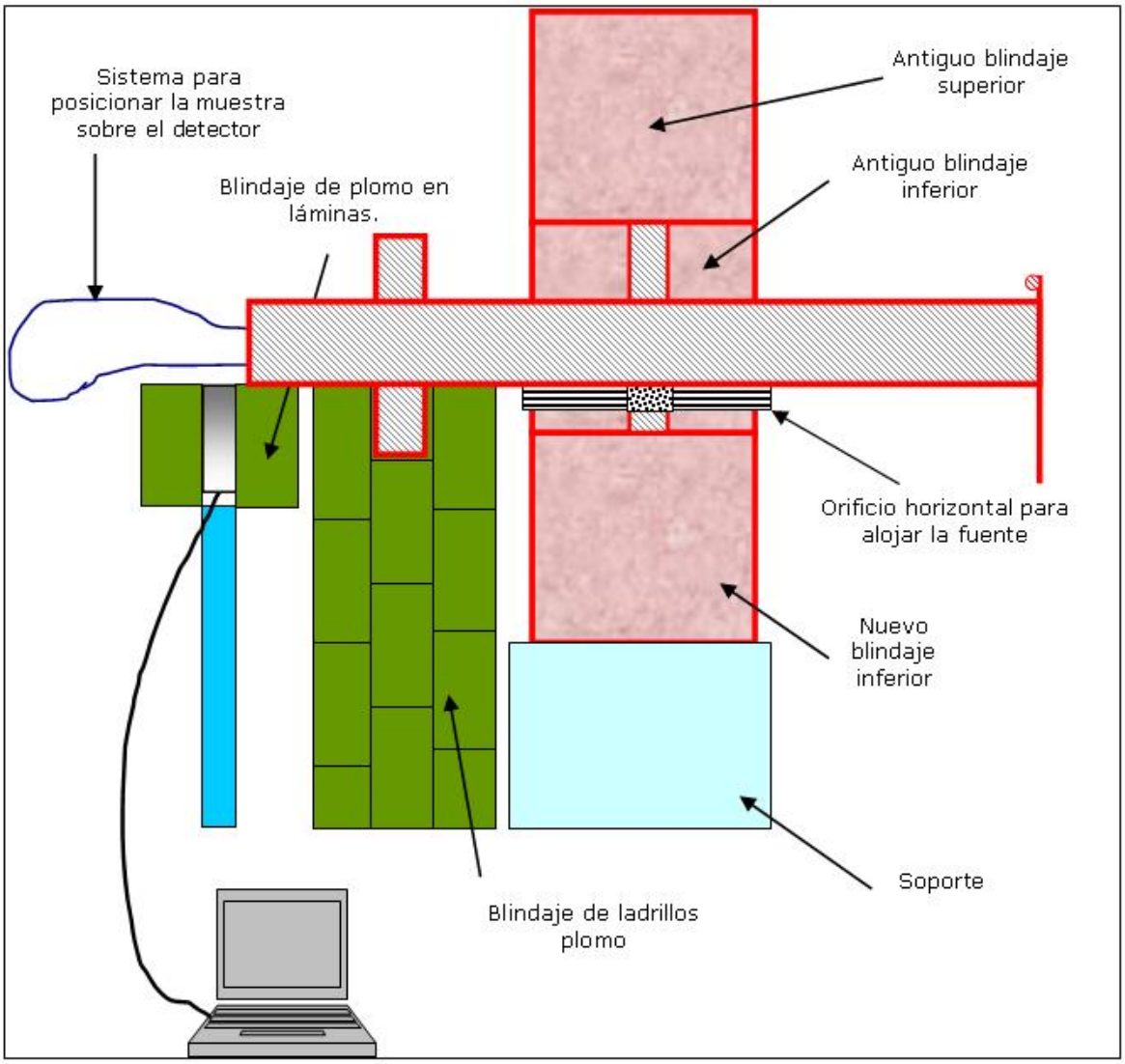


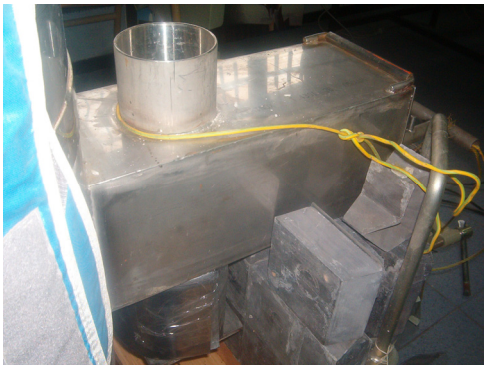
Figura 456. Segundo prototipo modificado para colocar blindaje de ladrillos de plomo.

En las Fotografía 52 a la Fotografía 57 se ven los detalles del segundo prototipo modificado.

Fotografía 52. Aspecto general del segundo prototipo modificado por la posición del detector fuera de su alojamiento.

Fotografía 53. El detector se sujetó provisionalmente en un soporte tras la pantalla de plomo.

Fotografía 54. Detalle dela zona del detector y de la pantalla de plomo.



Fotografía 55. Pantalla de plomo posterior a la posición original para el detector

Fotografía 56. Vista lateral del segundo prototipo modificado.

Fotografía 57. Aspecto del conjunto.

6.6.1. Relación de medidas obtenidas con el segundo prototipo.

Una vez realizada la pantalla de plomo necesaria para reducir el fondo se procedió a realizar series de medidas con diferentes parámetros. En primer lugar se midieron las muestras del primer conjunto, que tienen, para la misma ley dos tipos de envase, según se vio anteriormente. Se pretendía con ello, averiguar la influencia del tipo de envase.

A continuación se exponen los resultados, y como se hizo anteriormente se escribe entre llaves {xxx} la referencia a los archivos que aparecen en el ANEXO "*Relación de archivos de datos tomados en el laboratorio*", el número de cuentas en cada canal, es un número muy bajo, por lo que utiliza como medio de correlación con la ley de la fluorita las lecturas recogidas en un intervalo de energías comprendido entre 4500 y 7500 keV.

2 minutos de activación 25 s de lectura			
Denominación de la muestra	***Peso de la muestra***	***Lectura entre 4495 y 7503***	***ley***
1A {36}		31	4,20
1B {43}	101	69	36,75
1B {44}	50	58	36,75
2A {41}	303,347	77	27,85
2B {37}	313,280	194	87,02
3A {42}	295,545	85	36,75
3B {38}	303,953	25	4,2
4A {45}	298,885	131	61,83
4B {39}	317,179	252	97,2
5A {46}	312,026	181	74,33
5B {33}	293,922	172	74,3
5B {40}	293,922	176	74,33
6A {47}	305,992	213	87,02
6B {34}	311,397	70	24,85
7A {48}		299	97,20
7B {35}	294,415	148	61,83

Tabla 185. Lecturas realizadas con el primer conjunto de muestras y analizadas con el segundo prototipo.

Llevando estos datos a una gráfica preliminar, se ha obtenido la Figura 457 en la que se aprecia que se está avanzando en la dirección correcta para obtener una buena correlación entre las medidas de las cuentas de la muestra activada y las leyes, pues responde a lo esperado de que aumentarán las cuentas al aumentar la ley de la fluorita. Esta es la primera serie de medidas con resultados lo suficientemente satisfactorios como para justificar los trabajos anteriores y los posteriores desarrollos.

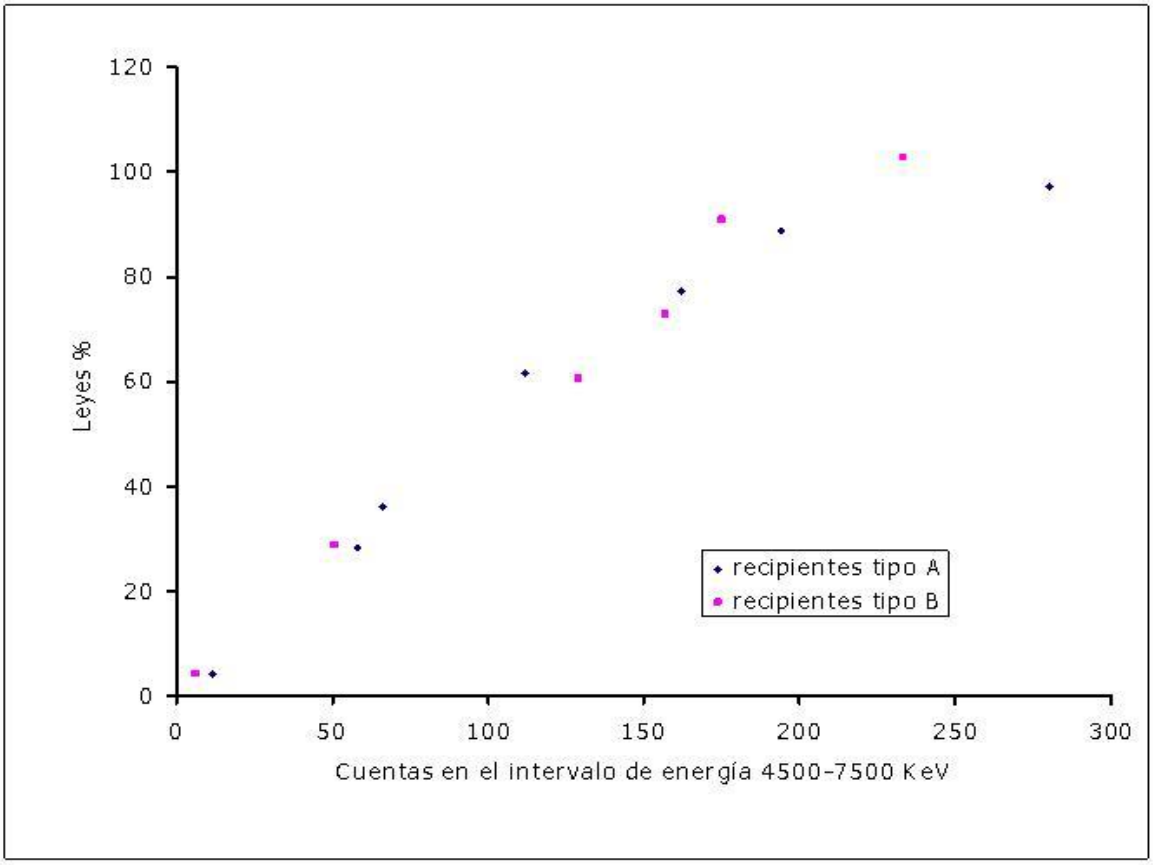


Figura 457. Representación de las primeras lecturas realizadas con el segundo prototipo.

Tras estos resultados se plantearon una serie de ensayos para ver la influencia de distintos factores en las medidas, si bien en principio se espera que la mayor influencia sea respecto al peso de la muestra, y hacia esa dirección se encaminaron las principales medidas.

a. el grado de compactación de la muestra. En la Tabla 186, se exponen los resultados de esta comparación, y de estas medidas se observa que, en principio, el grado de compactación de la muestra no influye significativamente.

Influencia de la compactación 2 minutos de activación 25 s de lectura			
Denominación de la muestra	***Peso de la muestra***	***Lectura entre 4495 y 7503***	***ley***
7A sin compactar{48}		299	97,20
7A compactada {49}		281	97,20

Tabla 186. Influencia del grado de compactación.

b. Tiempo de activación. En la Tabla 187 se exponen las cuentas obtenidas con la muestra de la misma ley, con distintos tiempos de activación. Se corrobora en esta tabla que al aumentar el tiempo de activación aumenta el número de cuentas.

Influencia del tiempo de activación Muestra 7A 25 s de lectura			
Tiempo de activación	***Peso de la muestra***	***Lectura entre 4495 y 7503***	***ley***
2 minutos{48}		299	97,20
1 minuto {50}		282	97,20
50 s {53}		246	97,20
45 s {52}		213	

Tabla 187. Influencia del tiempo de activación.

c. Influencia del peso de la muestra. En principio, se espera que el número de cuentas sea proporcional al peso de la muestra. De la Tabla 188 se deduce que incrementos de masa suponen incrementos de cuentas, pero estos incrementos no son lineales. Se pone de manifiesto, pues, la importancia de otros fenómenos como pueden ser la reducción del flujo de neutrones o la atenuación de los rayos gamma en la propia muestra.

Por esa razón, se ha medido también la altura de la muestra.

Influencia del peso de la muestra Muestra7, ley= 97,20% en F_2Ca. 25 s de lectura		
Peso de la muestra en gramos	***Altura de la muestra***	***Lectura entre 4495 y 7503***
100 {54}		156
150 {55}	2,7 cm	197
200 {56}	3,8 cm	221
250 {57}	4,2 cm	214
300 {58}	6	253
350 {59}	7	231
400 {60}	7	247
450 {61}	8	264
500 {62}	8,5	299
500 {63}	8,5	272
550 {64}	9	265
600 {65}		268

Tabla 188. Influencia del peso y de la altura de la muestra.

Estas medidas se han completado con muestras de otras leyes, si bien en este caso se exponen las lecturas en otro intervalo de energías:

- Ley 4,20% correspondiente a las muestras 1A = 3B
- Ley 27,85 correspondiente a las muestras 2A = 6B
- Ley 36,75 correspondiente a las muestras 3A = 1B

- Ley 74,33 correspondiente a las muestras 5A = 5B

Para cada cantidad en gramos se recogieron al menos tres registros, y los resultados se reflejan en las Tabla 189, Tabla 190, Tabla 191, Tabla 192.

Muestra 1A = 3B ley 4,20 2 minutos de activacion Fondos 13, 10, 11, 19, 13, 10, 15		
Cantidad en gramos	***Lectura entre 4495 y 5999***	***Lectura entre 4495 y 6500***
50 {114}	16	18
{115}	11	16
{116}	15	21
100 {117}	18	19
{118}	19	23
{119}	16	22
150 {120}	20	29
{121}	18	22
{122}	17	20
200 {123}	23	25
{124}	22	25
{125}	20	23
250 {126}	21	23
{127}	23	28
{128}	28	34
{129}	26	26
300 {130}	17	20
{131}	20	22
{132}	23	26
{133}	24	27
350 {134}	22	27
{135}	26	25
{136}	24	34
{137}	22	25
400 {138}	17	21
{139}	23	26
{140}	30	39
{141}	29	32
450 {142}	19	25
{143}		
{144}	22	23
{145}	17	20
{146} (5 minutos de activación)	21	24

Tabla 189. Influencia del peso en muestras de ley en F_2Ca de 4,20%.

Muestra 2a = 6B ley 27,85% 2 minutos de activacion Fondos 16, 14, 19		
Cantidad en gramos	**Lectura entre 4495 y 5999**	**Lectura entre 4495 y 6500**
50 {147}	40	46
{148}	38	47
{149}	36	47
{150}	29	34
100 {151}	59	70
{152}	39	46
{153}	42	47
150 {154}	46	49
{155}	58	67
{156}	42	48
200 {157}	79	88
{158}	64	77
{159}	59	66
250 {160}	61	67
{161}	63	67
{162}	62	70
300 {163}	73	80
{164}	63	72
{165}	57	66
{166}	67	78
350 {167}	49	56
{168}	51	57
{169}	59	62
{170}	65	69
400 {171}	52	65
{172}	63	70
{173}	50	59
{174}	59	69
450 {175}	45	54
{176}	56	59
{177}	61	69
{178}	53	63

Tabla 190. Influencia del peso en muestras de ley en F_2Ca de 27,85%.

Muestra 3a = 1B ley 36,75% 2 minutos de activacion Fondos 17, 18, 20		
Cantidad en gramos	**Lectura entre 4495 y 5999**	**Lectura entre 4495 y 6500**
50 {179}	48	55
{180}	50	58
{182}	48	50
{183}	41	51
100 {184}	55	64
{185}	56	63
{186}	66	78
150 {187}	72	84
{188}	62	76
{189}	63	73
{190}	55	65
200 {191}	74	90
{192}	78	90
{193}	80	91
{194}	78	85
250 {195}	72	83
{196}	66	79
{197}	91	103
{198}	77	91
300 {199}	78	87
{200}	100	112
{201}	74	81
{202}	86	100
350 {203}	78	82
{204}	87	98
{205}	89	95
{206}	85	95
400 {207}	78	92
{208}	81	94
{209}	89	95
{209}	94	105

Tabla 191. Influencia del peso en muestras de ley en F_2Ca de 36,75%.

Muestra5a = 5B ley 74,33% 2 minutos de activacion Fondos 13,13		
Cantidad en gramos	**Lectura entre 4495 y 5999**	**Lectura entre 4495 y 6500**
50 {254}	74	82
{255}	94	108
{256}	83	94
{257}	91	105
100 {258}	119	142
{259}	119	133
{260}	114	136
{261}	130	145
150 {262}	116	132
{263}	146	171
{264}	116	130
{265}	130	146
200 {266}	163	183
{267}	150	172
{268}	143	170
{269}	151	169
250 {270}	157	172
{271}	137	156
{272}	170	199
{273}	133	147
300 {274}	145	165
{275}	148	166
{276}	152	171
350 {277}	158	181
{278}	160	181
{279}	157	179
400 {280}	185	207
{281}	141	159
{282}	150	172
{283}	160	180
450 {284}	156	177
{285}	160	185
{286}	170	182
{287}	171	188

Tabla 192. Influencia del peso en muestras de ley en F_2Ca de 74,33%.

Los resultados de la Tabla 188 en el mismo rango de energías de esta nueva serie de medidas de exponen en la siguiente tabla:

Influencia del peso de la muestra Muestra7, ley= 97,20% en F_2Ca. 25 s de lectura		
Cantidad en gramos	**Lectura entre 4495 y 5999**	**Lectura entre 4495 y 6500**
100 {54}	137	148
150 {55}	166	189
200 {56}	179	204
250 {57}	192	203
300 {58}	207	240
350 {59}	192	219
400 {60}	204	235
450 {61}	220	252
500 {62}	251	282
500 {63}	225	262
550 {64}	222	257
600 {65}	232	257

Tabla 193. Medidas de la Tabla 188 referidas a otros intervalos de energía.

d. Rango de energía. Se han analizado las 14 muestras iniciales y se han obtenido sus espectros. Los registros son

los indicados en la Tabla 185. De estos espectros, se ha realizado la integral de la intensidad de la radiación en distintos intervalos de energía, (lo que en la Tabla 194 se ha llamado ROI, por el acrónimo en inglés utilizado en el software "región de interés"). Se han representado las múltiples nubes de puntos para cada una de esas regiones de interés en gráficos ley – número de cuentas totales. Se ha calculado las rectas de correlación por el método de mínimos cuadrados, y se ha calculado el valor del coeficiente de correlación R^2 para cada una de las rectas.

Los resultados para cada uno de estos intervalos, o sus combinaciones aparecen en dicha Tabla 194. En principio, se pone de manifiesto que la mejor correlación se obtiene en el rango 4500 – 6000. Por ello, en las siguientes mediciones se ha utilizado dicho rango para analizar los resultados, aunque se ha grabado el espectro completo en el registro, y se pueden analizar posteriormente cualquier otro intervalo.

Intervalo	***Coeficientes de correlación R^2***	
ROI 1 : 3998 - 4449	0,8507	
ROI 2 : 4500 – 4995	0,92	0,94
ROI 3 : 5007 – 5508	0,9169	
ROI 4 : 5533 – 5999	0,9246	
ROI 5 : 6023 – 6511	0,70	
ROI 6 : 6531 – 7077	0,4585	

Tabla 194. Coeficiente de correlación R^2 para distintos intervalos de energía.

e. Nuevo conjunto de muestras. Tras los primeros análisis con las catorce muestras iniciales, se preparó un nuevo conjunto de muestras, cuyo análisis corresponde a la Tabla 170, que se sometió inicialmente a 1 minuto de activación y 25 segundos de lectura. Los resultados de las lecturas en el intervalo comprendido entre los canales 4500 y 6000 se refleja en la Tabla 195.

Nuevo conjunto de muestras. Tiempo de activación 1 minuto			
Muestra	***Lectura fondo***	***Lectura postactivación***	***Ley***
1A	13 {385}	22 {66}	3,48
2A	13 {386}	45 {67}	33,2
2A		37	33,2
3A	19 {387}	{68}	33,2
1B	11 {388}	14 {69}	3,53
1C	17 {389}	27 {70}	3,53
1D	18 {390}	18 {71}	

Tabla 195. Lecturas realizadas con el segundo conjunto de muestras y analizadas con el segundo prototipo.

Posteriormente, el resto de los análisis se realizaron con dos minutos de activación. En la Tabla 196 se exponen los resultados.

Nuevas muestras Tiempo de activación 2 minutos.				
Muestra	**Lectura fondo**	**Lectura postactivación**	**leyes**	**pesos**
1A	12 {392}	18 {74}	3,48	257,1
1B	18 {393}	22 {75}	3,53	269,9
1C	14 {394}	17 {76}	3,53	254,6
1E	6 {395}	18 {77}	4,54	227,1
2A	18 {396}	- {78}	33,2	181,6
3A	15 {397}	67 {79}	33,2	205,7
2B	18 {398}	47 {80}	16,12	223,9
2C	11 {399}	26 {81}	15,93	166,7
2D	19 {400}	49 {82}	17,93	232,9
3B	12 {401}	83 {83}	36,07	190,4
3C	12 {402}	75 {84}	36,59	139,08
3D	19	72 {85}	37,64	230,6
3E	14 {403}	-	39,47	177,3
4A	13 {404}	169 {86}	70,11	300,85
4C	11 {405}		31,3	337,2
S3	7 {343}	35 {87}	10,86	
S1	9 {344}	15 {88}	2,36	
S7S	13 {345}	105 {89}	54,06	
	9 {346}			
8	10 {406}	156 {91}	74,3	
9	9 {407}	147 {92}	74,3	
	10 {408}			
4C	10 {409}	56 {94}	31,3	337,2
3E	16 {410}	69 {95}	39,47	
2A	14 {411}	28 {96}	33,2	
1D	9 {391}	17 {73}		

Tabla 196. Lecturas de las nuevas muestras.

f. Influencia de la humedad de la muestra. Para ver el grado de influencia de la humedad se tomó la muestra S7 seca, obtenida después de un procedimiento de secado en estufa de la muestra S7, y se compararon los resultados con los de la muestra con la humedad original. Los resultados se reflejan en la Tabla 197.

Muestra S7 del segundo conjunto de muestras. Ley 54,06%		
Muestra	**Lectura fondo**	**Lectura postactivación**
Seco	13 {345}	105 {89}
Seco		119 {101}
Seco		117 {102}
húmedo		108 {103}
húmedo		133 {104}
húmedo	9 {346}	116 {90}

Tabla 197. Influencia de la humedad.

g. Influencia del tamaño de grano. Se analizaron muestras de diferentes granulometrías con objeto de determinar la influencia del tamaño de grano en la muestra. En la Tabla 198 se exponen los resultados de los análisis.

	Tamaño de grano	
piedra		158 {97}
Piedra		154 {98}
Piedra		156 {99}
Piedra		157 {100}
Piedra		124 {93}

Tabla 198. Influencia del tamaño de grano de la muestra.

h. Falta de homogeneización. Para averiguar el grado de influencia que tendría la falta de homogeneización de la muestra se planificaron una serie de ensayos en los cuales, en un contenedor se disponía 100 gr de fluorita en polvo de una determinada ley, y sobre esta capa, sin homogeneizar, se vertía otros 100 gr. de fluorita de otra ley diferente. Estas muestras se han denominado "estratificadas".Al final del proceso se homogeneizaba el conjunto. Los ensayos y sus resultados se muestran en la Tabla 199.

Muestras estratificadas	***Lectura***
100 gr Z (ley 4%)	15 {106}
100 gr ácido Y (ley 97%)	148 {110}
100 gr de Y con ley 97% sobre 100 gr de Z	25 {105}
102 gr de MA (conc 99) sobre 100 Y (97%) sobre 100 gr Z	51 {107}
Homogeneizado lo anterior	119 {108}
100 gr de Z sobre 100 gr de Y	163 {109}
100 gr MA sobre 100 gr de Z sobre 100 gr de Y	157 {111}
Idem	{112}
Homogeneización de anter.	{113}

Tabla 199. Muestras en capas de distintas concentraciones.

En las Fotografía 58 y Fotografía 59 se muestra el estado de una muestra estratificada.

Fotografía 58. Muestra con contenido estratificado de producto.

Fotografía 59. Muestra con contenido estratificado de producto.

i. Influencia del tamaño de grano. Se estudiaron las muestras de la Tabla 172 que tienen una ley de 33,53%, y sus resultados se muestran en la Tabla 200

Muestra ley 33,53% 2 minutos de activacion Fondos 17, 18, 20,11,11,11		
Muestra	**Lectura entre 4495 y 5999**	**Lectura entre 4495 y 6500**
Grano a {210}	68	
{211}	54	
{212}	71	
{213}	56	
{214}	70	
{215}	58	
{216}	57	
{217}	59	
B {218}	68	
{219}	58	
{220}	67	
{221}	69	
{222}	68	
{223}	75	
{224}	67	
{225}	75	
c {226}	82	
{227}	81	
{228}	67	
{229}	74	
{230}	68	
{231}	78	
{232}	69	
{233}	75	
d {234}	63	
{235}	67	
{236}	58	
{237}	64	
{238}	67	
{239}	47	
{240}	68	
{241}	77	
e {242}	67	
{243}	56	
{244}	55	
{245}	59	
{246}	65	
{247}	70	
{248}	63	
{249}	61	
{250}gre3079	56	

Tabla 200. Influencia de la granulometría en muestras de ley en F_2Ca de 33,53%.

7. Discusión y análisis de los resultados.

7.1. Visualización del espectro de emisión del ^{16}N.

Todos los espectros que se han obtenido en los distintos ensayos tienen un número de cuentas global especialmente bajo. Esto es debido a las particularidades de la activación del flúor por una parte y por otra a la baja actividad de la fuente, además de las características del detector utilizado.

Por las particularidades de la activación del flúor, como ya se ha indicado, se producen rayos gamma de alta energía, del orden de 6 MeV. Las fuentes de radiación gamma convencionales emiten en rangos de energía mucho menores. Por ejemplo el Cesio y el Cobalto emiten energías de 661 keV o del orden de 1100, a 1335 keV, respectivamente.

Por otra parte, el detector de INa no se recomienda para trabajar con niveles de energía mayores de 2 MeV. debido a su bajo rendimiento en estos niveles de energía. De esta manera incluso resulta difícil encontrar datos de rendimiento del detector por encima de estos valores.

La fuente de neutrones utilizada tiene una actividad de 1 Ci. En la bibliografía se han encontrado referencias que indican que el flujo de neutrones necesario para análisis de activación es considerablemente mayor que el que aporta la fuente de neutrones de 1 Ci.

Todos estos factores apuntan hacia la misma dirección de obtención de pocas cuentas totales en el intervalo de posible interés.

Si tenemos 200 cuentas en canales que van desde el 3000 al 6000 se comprende que el número de cuentas por canal es extremadamente bajo. En todos los ensayos se comprobó este efecto no superándose nunca el valor de 3 cuentas por canal en ninguna circunstancia.

Por esta razón la forma de un espectro individual no da ninguna información ni tiene un aspecto como el que se podría esperar.

Para soslayar este inconveniente se ha ideado un procedimiento que consiste en sumar el mayor número de espectros posibles, y posteriormente representar gráficamente esa suma.

Se trató que los espectros a sumar tuviesen una serie de características comunes, tales como que se obtuvieran con muestras de la misma ley, de la misma masa, e iguales tiempos de activación y lectura. Del análisis de estas figuras se deducen las siguientes conclusiones:

a. Figura 458. Espectro de una muestra de fluorita.

   Esta figura representa el espectro de la activación del flúor, donde se puede ver de forma clara que aparece un pico en torno a 6128 keV que se corresponde con el valor de la energía de los rayos gamma producida por el 16N, (esto correspondería a las cuentas obtenidas por el efecto fotoeléctrico).

Aparecen otros dos picos en dos niveles de energía menores que el pico anterior y que distan de este unos 500 keV y 1000 keV respectivamente. Estos dos picos corresponderían a los picos de escape 1º y 2º producidos por la formación de pares electrón positrón.

La amplitud de estos picos es bastante mayor que la correspondiente al fotopico. La explicación es la que se indicó en 4.2.1. ya que la cantidad de rayos gamma que interaccionan en el interior del detector por el fenómeno fotoeléctrico disminuye con el cubo de la energía (E^3), mientras que el fenómeno de formación de pares crece linealmente a partir de 1 MeV aprox. (1,022 MeV).

De esta manera, el fenómeno que cobra más importancia (como aparece indicado en toda la bibliografía), en el nivel de energía del espectro del 16N, es la formación de pares.

La zona del espectro correspondiente al intervalo 3 – 5 MeV, contendrá cuentas correspondientes a los fenómenos de formación de pares y de efecto Compton.

El frente Compton no aparece en la figura ya que queda oculto bajo los picos de escape.

b. Se representan en la Figura 459 los espectros correspondientes a las lecturas de fondo, así como a las lecturas de muestras con las leyes que se indica.

   Se observa la relación que existe entre la altura del espectro y la ley de la muestra.

   Se aprecia en esta figura igualmente, como la relación señal/fondo más conveniente se encuentra en los intervalos entre 4,5 y 6 MeV o bien entre 4,5 y 6,5 MeV. Si bien se observa que en el rango entre 3 y 4 MeV también hay señal, la relación señal/fondo en esta zona es peor.

c. En la Figura 460 se representa lo dicho anteriormente salvo en que, en ese conjunto de leyes no se tenía un número de espectros elevados para analizar.

   Se comprueba que, debido al bajo número de espectros sumados para formar esta imagen, el perfil de la curva de uno de estos espectros para una ley dada, presenta muchas oscilaciones que dificultan su análisis.

d. En la Figura 461, se visualiza un espectro correspondiente a una muestra de una ley del 4%, junto con el fondo. Los datos representados en dicha figura, corresponden a las cuentas, modificados a través de una media móvil de alto valor. Con esto se ha conseguido discriminar la zona de influencia del fondo respecto a la de la señal, confirmando los intervalos de 4,5 a 6 MeV, y de 4,5 y 6,5 MeV que se contemplan en el análisis.

e. En la Figura 462 se han representado simultáneamente (con distinta escala vertical), el espectro de una muestra de fluorita activada y el espectro del fondo. De esta manera se puede visualizar una correspondencia entre los picos del fondo y algunos picos del espectro de la fluorita.

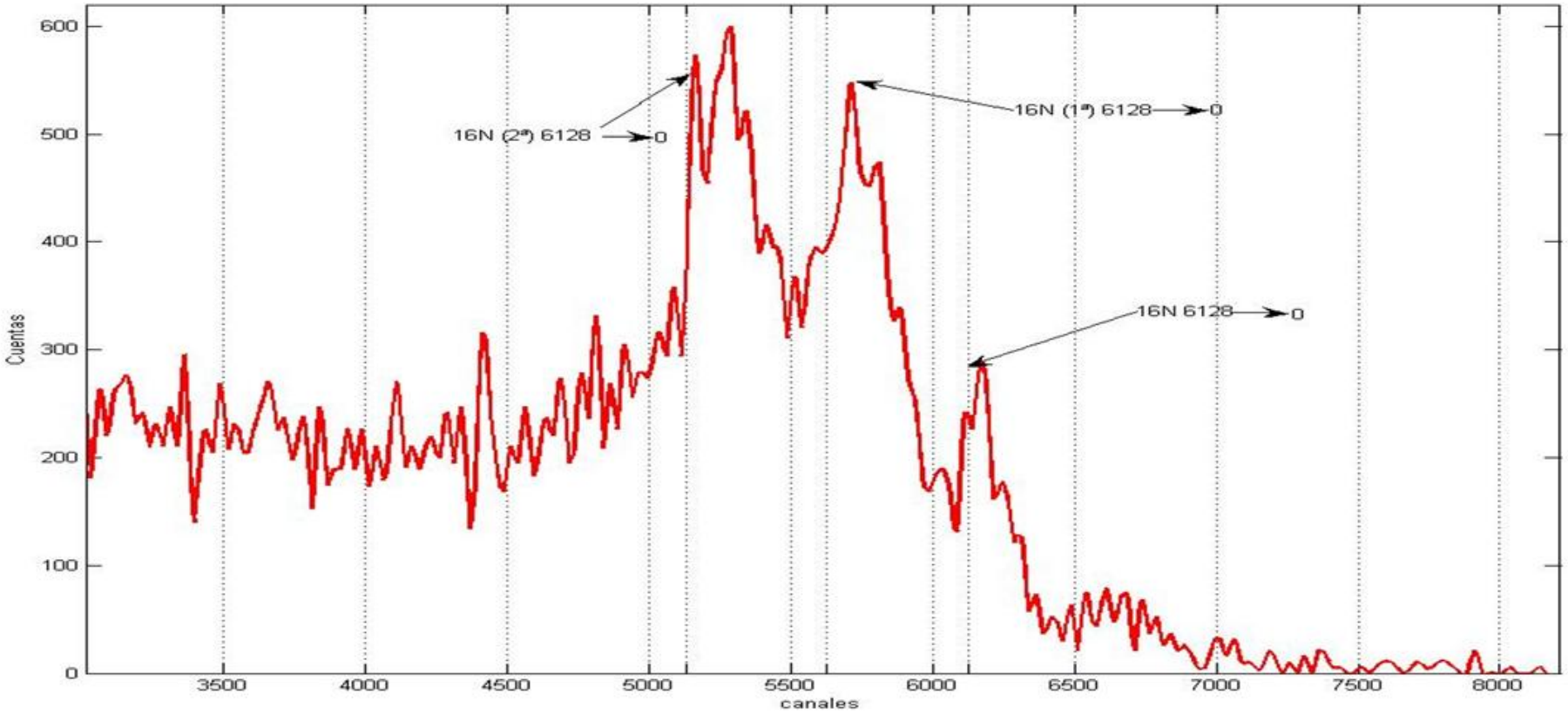


Figura 458. Espectro de una muestra de fluorita.

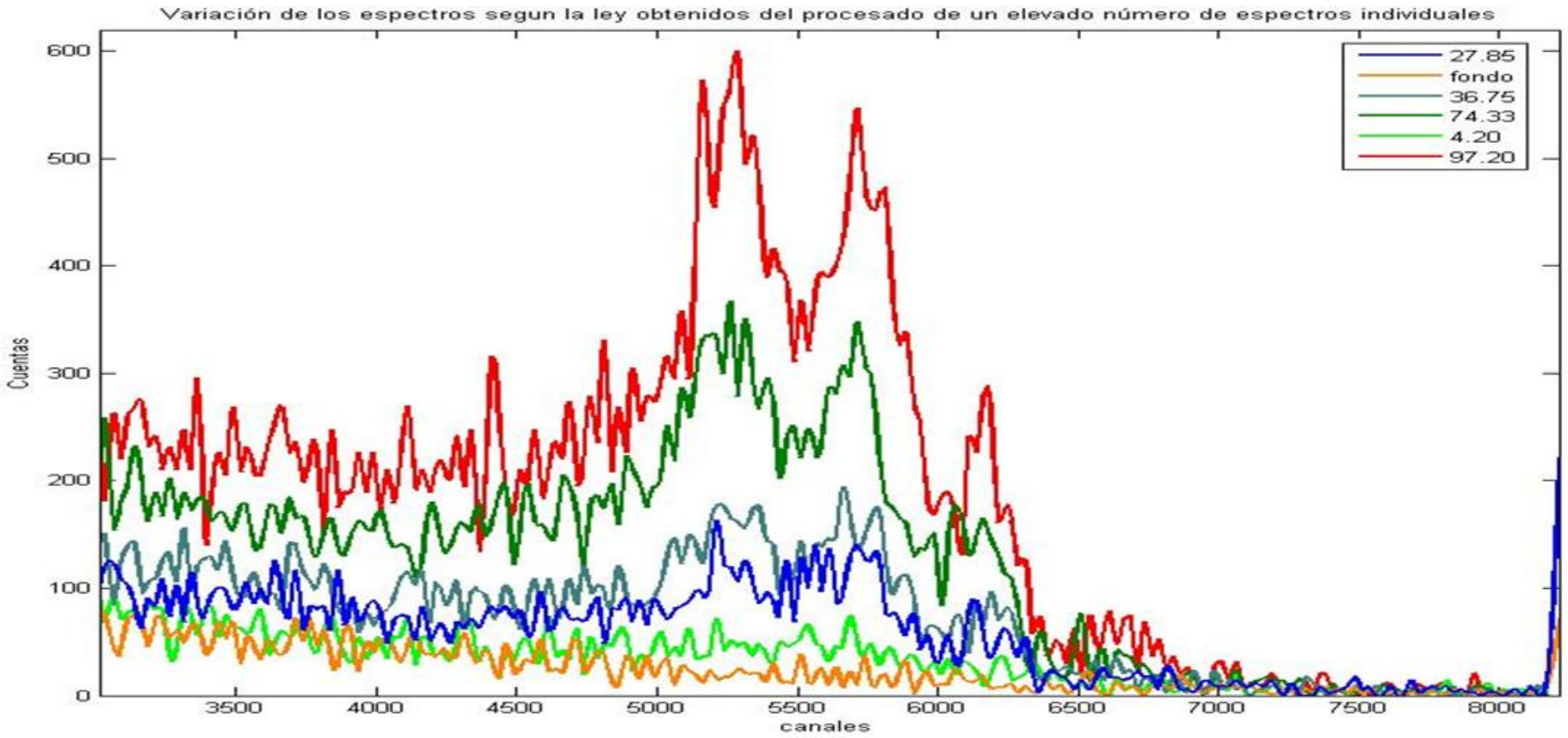


Figura 459. Suma de espectros de fondo y de muestras de distintas leyes. En el recuadro se muestran las leyes.

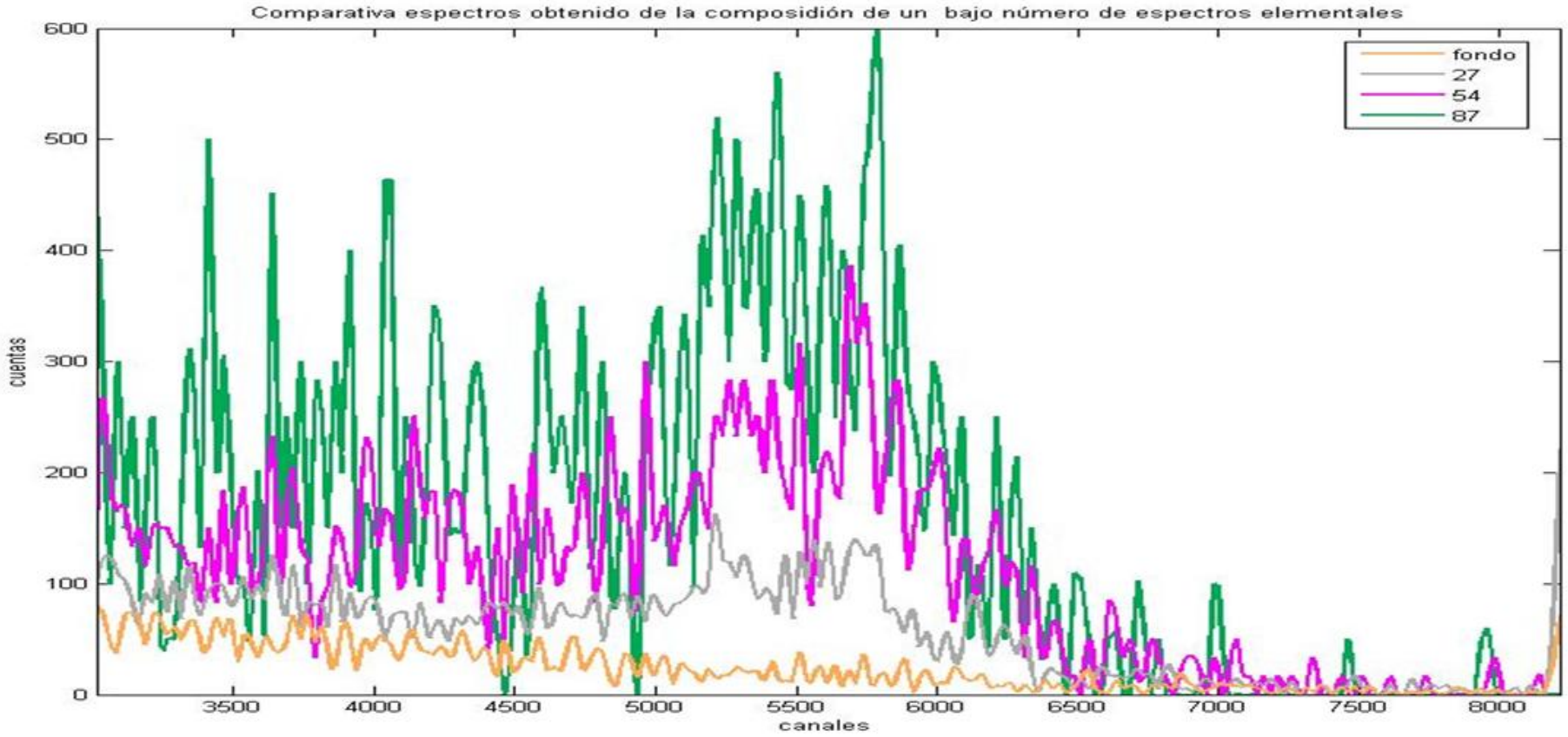


Figura 460. Suma de espectros de fondo y de muestras de distintas leyes. El número de datos de partida es muy bajo.

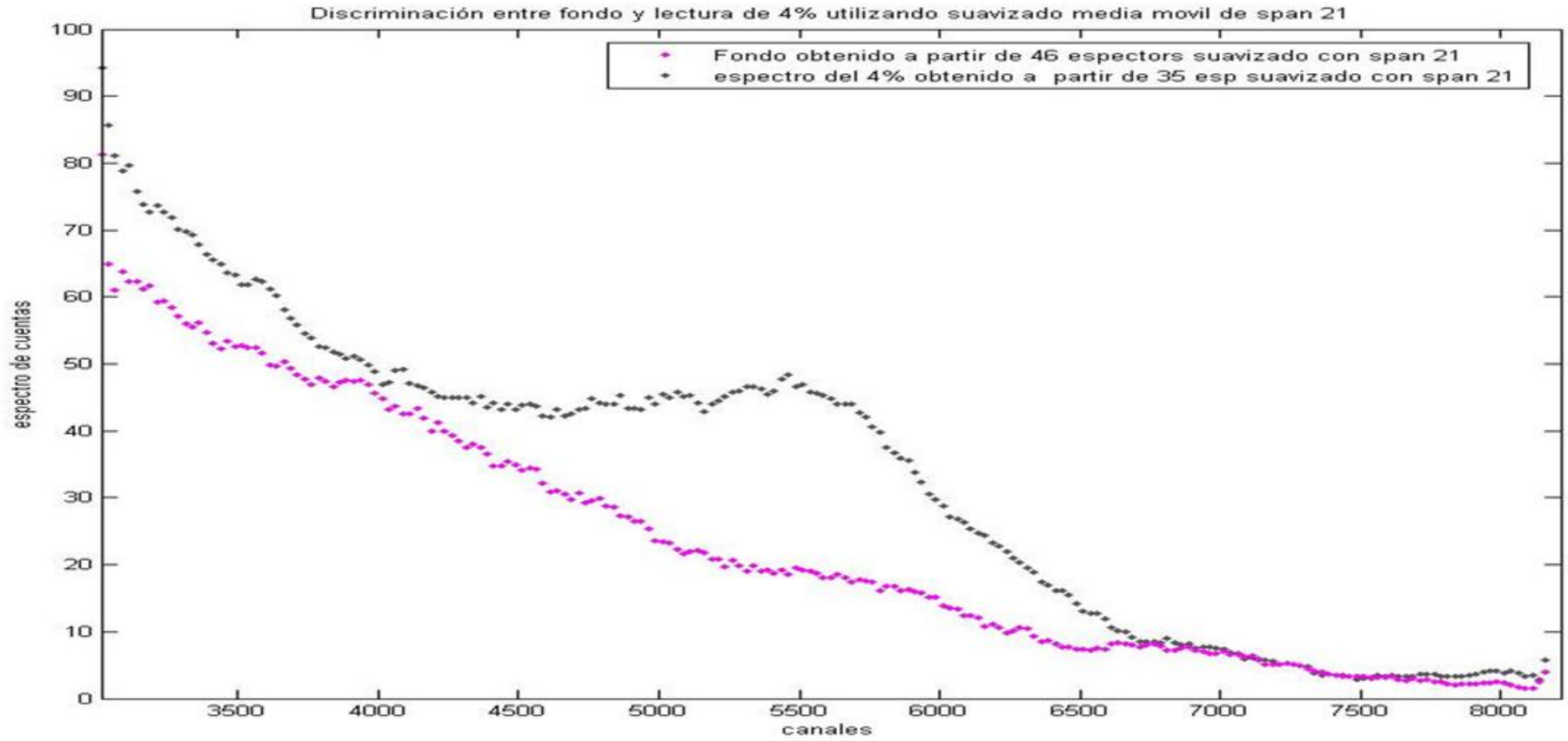


Figura 461. Discriminación entre fondo y espectro de muestra de fluorita de baja ley.

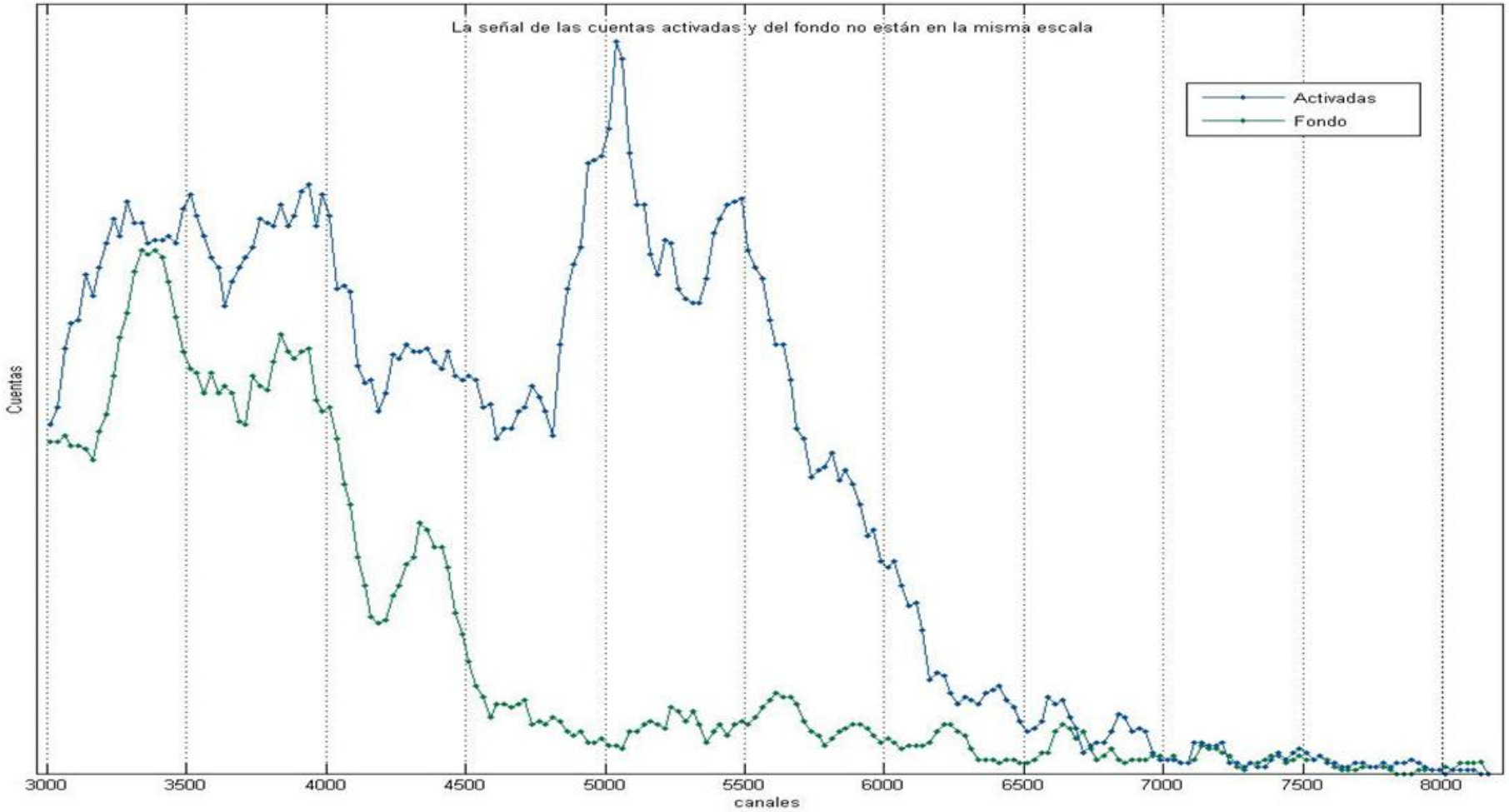


Figura 462. Espectro de muestras de fluorita y de fondo obtenido como media móvil con intervalos de cinco unidades.

7.2. Estudio del fondo detectado.

7.2.1. Espectro gamma teórico de la fuente de neutrones.

Una vez establecido experimentalmente, (Figura 450 en 6.5.4. Ensayos con el primer prototipo.) la responsabilidad de la fuente en la respuesta de fondo, se decide analizar más exhaustivamente las emisiones de los rayos gamma de alta energía de la fuente de neutrones.

Los posibles responsables de estas emisiones pueden ser:

- El americio 241, o cualquiera de sus descendientes.
- La reacción Am → Be
- Los productos de la reacción.
- La presencia de otros elementos.

No se contempla la posibilidad de que el responsable sea el Berilio, ya que es estable.

En lo que respecta al Americio, su cadena de desintegración se muestra en la Figura 463. Sobre las flechas se indica el tipo de desintegración que sufre el elemento, y la energía máxima de los rayos gamma a los que da lugar.

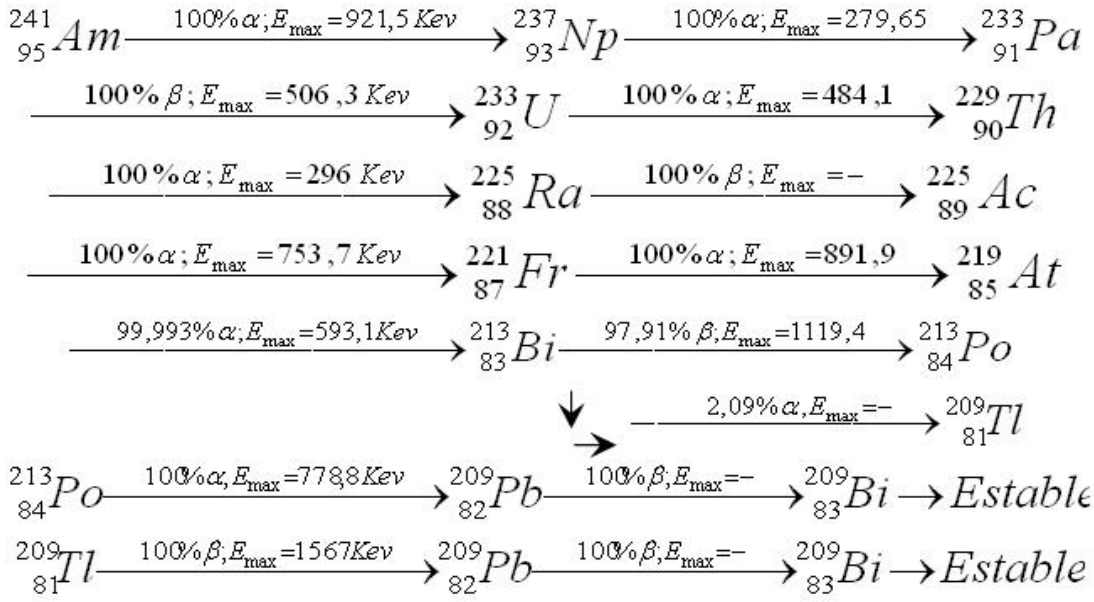


Figura 463. Esquema de la cadena radiactiva del 241 Americio.

Se observa en la tabla que ni el Americio, ni ninguno de sus descendientes emiten radiación gamma de una energía mayor de 1567

keV, luego no son responsables de las cuentas leídas por el detector en las proximidades del contenedor.

Respecto a la reacción 9Be(α,n), el trabajo publicado por R.K.Heaton, [96], muestra la distribución de las energías de rayos gamma provenientes de la interacción entre partículas α de energías determinadas, con diversos elementos objetivo, entre ellos, el Berilio.

Las medidas se llevaron a cabo en el ciclotrón del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley y se presentaron los resultados de la exposición de diversos objetivos constituídos por elementos ligeros, como el Berilio, a partículas α de 10, 8.8, 7.7, 7.0, 6.3 y 5.6 MeV.

Hay que hacer la consideración de que en una fuente de neutrones de Americio Berilio, las partículas α proceden del Americio y tienen una energía menor que la menor de las energías consideradas en el experimento de la referencia. Esto se aprecia en la Tabla 201 donde se listan las energías de las partículas α producidas por el 241 Am.

Energía (keV)	Intensidad (%)
4758	5E-6 %
4800	8.6E-5 %
4834	7E-4 %
5004	1E-4 %
5068	1.4E-4 %
5089	4.0E-4 %
5096	4.0E-4 %
5114	4E-4 %
5137	3.2E-4 %
5155	7E-4 %
5178	3E-4 %
5182	9E-4 %
5192	6E-4 %
5217	1.0E-5 %
5223	0.0013 %
5244	0.0024 %
5279	5E-4 %
5322	0.015 %
5388	1.660 %
5416	0.0100 %
5442	13.1 %
5469	0.020 %
5485	84.8 %
5511	0.225 %
5544	0.37 %

Tabla 201. Distribución de la energía de las partículas α procedentes de la desintegración del 241Am.

Los resultados del estudio se muestran en la Tabla 202 en forma condensada, es decir, el número de cuentas por partícula α del rango de energías se expresa por el valor numérico y la incertidumbre, seguido por la potencia de 10 en paréntesis. Por ejemplo una entrada de 4.3±1.2 (-7) indica una producción de $(4.3\pm1.2)*10^{-7}$ rayos gamma por partícula α.

Reacción (keV)		Energía de la partícula α (MeV). Cuentas por rayo α.					
		10.0	8.8	7.7	7.0	6.3	5.6
^{9}Be(α,n)	4439→0	1.18±0.23(-4)	1.03±0.14(-4)	7.06±0.31(-5)	6.38±0.25(-5)	5.66±0.25(-5)	4.06±0.16(-5)

Tabla 202. Producción de rayos γ al incidir partículas α de distintas energías en un objetivo espeso de Berilio.

Como el número de cuentas decrece con la energía, se supone que los rayos γ producidos por las partículas α provenientes del 241Am originarán un número de cuentas menor.

Por otra parte, la distribución de las energías de los rayos γ producido con partículas α de 10 MeV, se muestra en la Figura 464. Los rayos γ provienen de la excitación del nivel 4439 keV del ^{12}C originado en las reacciones $^{10}B(\alpha,d)^{12}C$ y $^{9}Be(\alpha,n)^{12}C$.

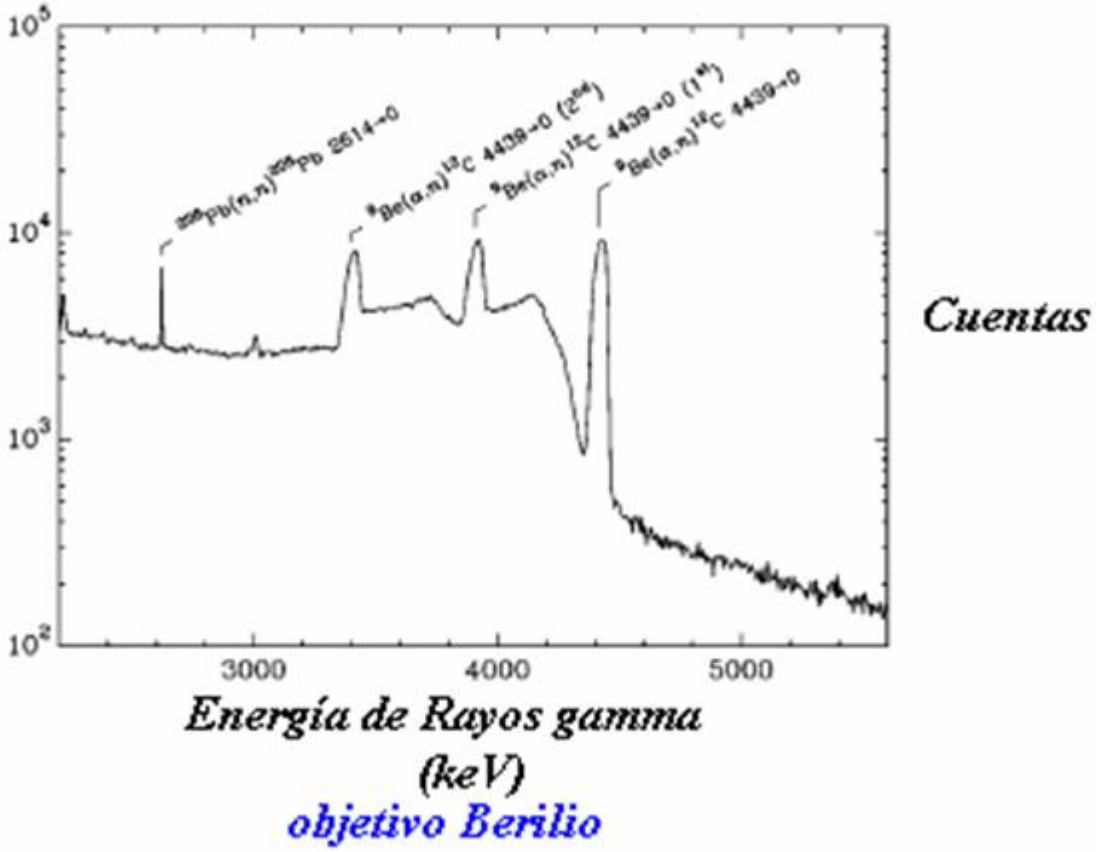


Figura 464. Distribución de las energías gamma originados al hacer incidir partículas α de 10MeV en un objetivo de Berilio.

En la figura del decaimiento obtenida en la base de datos NuDat, se aprecia dicho nivel de energía. (Figura 465).

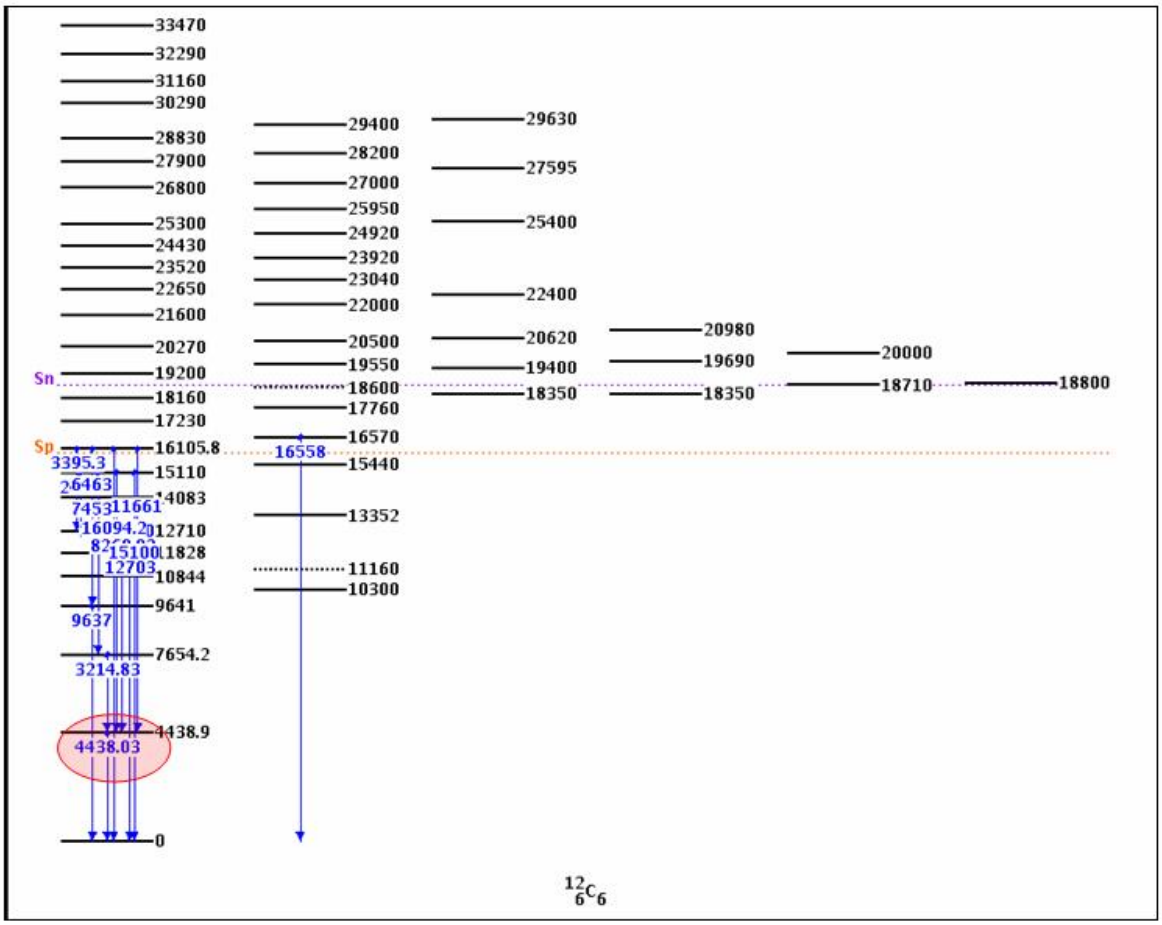


Figura 465. Niveles de energía del decaimiento del ^{12}C.

En dicho experimento, el rayo gamma de 2614 keV se origina por la reacción de los neutrones producidos con los blindajes de ^{208}Pb y se caracteriza por producir un pico muy estrecho.

Se llega a la conclusión por esta vía que la fuente de neutrones emite en niveles de energía elevados.

7.2.2. Perfil del fondo obtenido experimentalmente.

Del análisis de los datos experimentales correspondientes a las medidas de fondo, se obtiene el espectro de la Figura 466. La realización de este espectro se ha basado en las suma de las lecturas de un elevado número de fondos, y se ha suavizado haciendo una media móvil de cinco puntos.

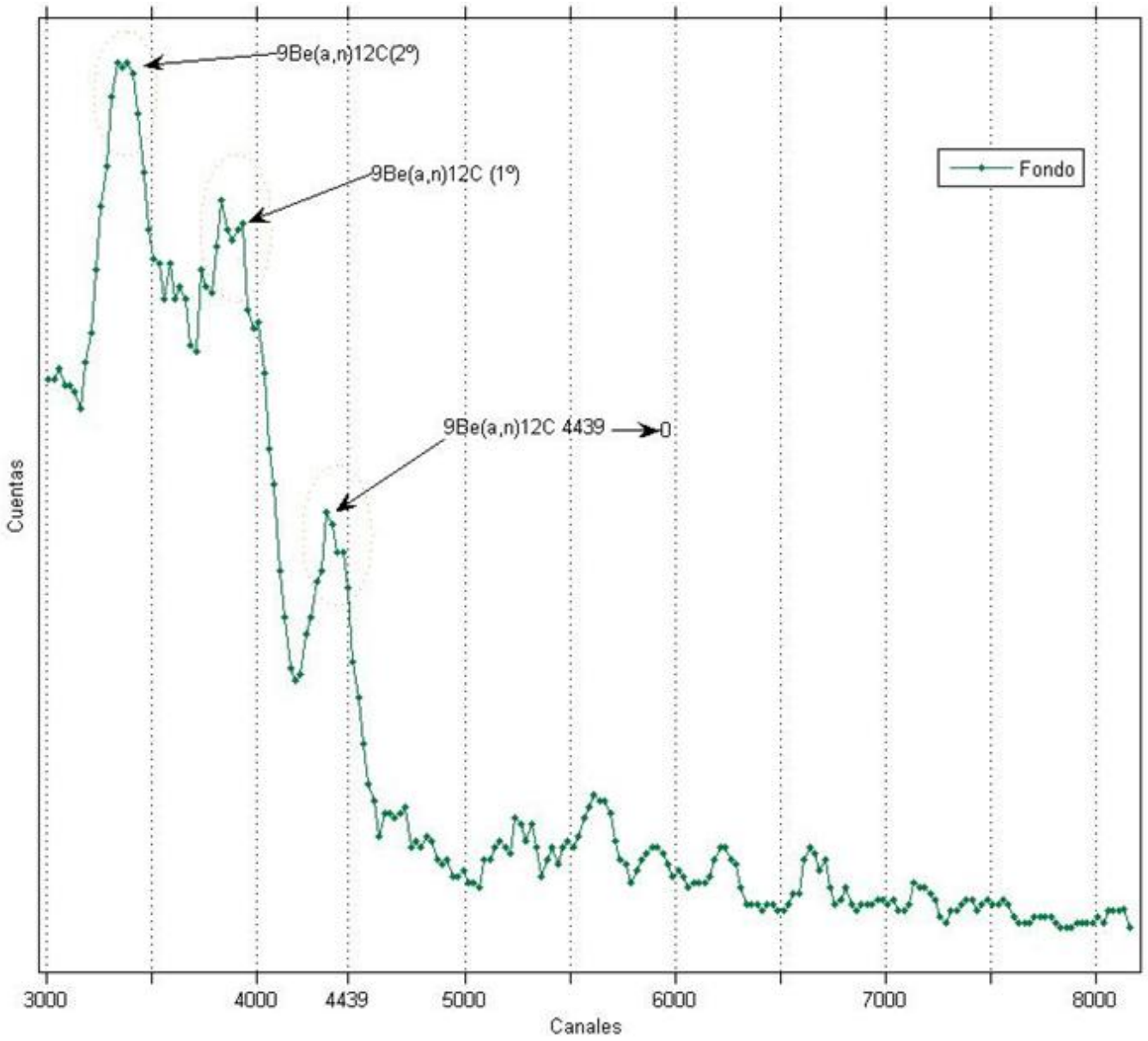


Figura 466. Fondo obtenido experimentalmente.

En la figura, se han marcado con flechas, los picos experimentales que tienen correspondencia con las posiciones del espectro teórico de la fuente de neutrones, según se ha visto anteriormente, que pertenecen a la reacción mencionada. Esta comparación permite concluir que el mecanismo de procedencia de las lecturas de fondo es la propia reacción 9Be(a,n)12C.

7.3. Análisis preliminares de la respuesta de una muestra de masa y ley determinada.

Con los datos de las Tabla 189, Tabla 190, Tabla 191, Tabla 192 y Tabla 193, correspondientes a las lecturas para distintas masas de leyes de 4,20%, 27,85%, 36,75%, 74,33% y 97,20% respectivamente, y masas variables a intervalos de 50 en 50 desde 50 hasta 450 gramos se han realizado las curvas de regresión entre cada ley y sus

correspondientes masas, utilizando para ello, en primer lugar, las curvas de regresión predefinidas en una hoja de cálculo.

Los resultados se reflejan en las Tabla 203 a Tabla 208 en el que se ha hecho las correlaciones con distintos tipos de ajuste: lineal, logarítmico, polinomial de segundo y tercer grado, potencial y exponencial, y considerando o bien la media de los datos o todos los datos.

Las ecuaciones a las que responde cada una de las regresiones son las siguientes:

- Regresión lineal: $y = ax + b$
- Regresión logarítmica: $y = aLn(x) + b$
- Polinómica de segundo orden: $y = ax^2 + bx + c$
- Polinómica de tercer orden: $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$
- Potencial: $y = ax^b$
- Exponencial: $y = ae^{bx}$

	Ley	Correlación Lineal Y=ax+b		Mejor correlación
		Intervalo de energías		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
Media de los puntos	4,2	0,4399	0,4837	4,5-6,5 MeV
	27,85	0,2515	0,2685	4,5-6,5 MeV
	36,75	0,8468	0,8887	4,5-6,5 MeV
	74,33	0,7492	0,7844	4,5-6,5 MeV
		Correlación Lineal Y=ax+b		
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	
todos los puntos	4,2	0,1741	0,2608	4,5-6,5 MeV
	27,85	0,188	0,2024	4,5-6,5 MeV
	36,75	0,6769	0,723	4,5-6,5 MeV
	74,33	0,6265	0,6674	4,5-6,5 MeV

Tabla 203. Coeficientes de regresión lineal de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía.

	Ley	Correlación Logarítmica		Mejor correlación
		Intervalo de energías		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
Media de los puntos	4,2	0,5958	0,6717	4,5-6 MeV
	27,85	0,4562	0,5005	4,5-6 MeV
	36,75	0,9639	0,9626	4,5-6,5 MeV
	74,33	0,9259	0,9454	4,5-6 MeV
		Correlación Logarítmica		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
todos los puntos	4,2	0,2433	0,3762	4,5-6 MeV
	27,85	0,3315	0,3658	4,5-6 MeV
	36,75	0,7741	0,7852	4,5-6 MeV
	74,33	0,7793	0,8087	4,5-6 MeV

Tabla 204. Coeficientes de regresión logarítmica de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía..

	Ley	polinomial grado 2		Mejor correlación
		Intervalo de energías		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
Media de los puntos	4,2	0,7105	0,8256	4,5-6 MeV
	27,85	0,7312	0,8283	4,5-6 MeV
	36,75	0,9745	0,9733	4,5-6,5 MeV
	74,33	0,9141	0,9271	Menor
		polinomial grado 2		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
todos los puntos	4,2	0,2023	0,4842	4,5-6 MeV
	27,85	0,5183	0,5896	4,5-6 MeV
	36,75	0,7831	0,7946	4,5-6 MeV
	74,33	0,7725	0,7959	4,5-6 MeV

Tabla 205. Coeficientes de regresión polinomial de segungo grado de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía.

	Ley	polinomial grado 3		Mejor correlación
		Intervalo de energías		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
Media de los puntos	4,2	0,7268	0,8348	4,5-6 MeV
	27,85	0,746	0,8446	4,5-6 MeV
	36,75	0,9776	0,9734	4,5-6,5 MeV
	74,33	0,9562	0,9684	4,5-6 MeV
		polinomial grado 3		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
todos los puntos	4,2	0,3113	0,49	4,5-6 MeV
	27,85	0,5303	0,603	4,5-6 MeV
	36,75	0,7855	0,7947	4,5-6 MeV
	74,33	0,8065	0,8294	4,5-6 MeV

Tabla 206. Coeficientes de regresión polinomial de tercer grado de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía..

	Ley	Correlación potencial		Mejor correlación
		Intervalo de energías		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
Media de los puntos	4,2	0,6358	0,7149	4,5-6 MeV
	27,85	0,5275	0,5724	4,5-6 MeV
	36,75	0,9596	0,9677	4,5-6 MeV
	74,33	0,899	0,9198	4,5-6 MeV
		Correlación potencial		
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	
todos los puntos	4,2	0,2911	0,4265	4,5-6 MeV
	27,85	0,3954	0,4376	4,5-6 MeV
	36,75	0,8113	0,8241	4,5-6 MeV
	74,33	0,7798	0,8122	4,5-6 MeV

Tabla 207. Coeficientes de regresión potencial de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía..

	Ley	Correlación exponencial		Mejor correlación
		Intervalo de energías		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
Media de los puntos	4,2	0,4549	0,5026	4,5-6 MeV
	27,85	0,3016	0,3191	4,5-6 MeV
	36,75	0,8074	0,8534	4,5-6 MeV
	74,33	0,6902	0,7222	4,5-6 MeV
		Correlación exponencial		corresponde a
		4,5-6,5 MeV	4,5-6 MeV	intervalo
todos los puntos	4,2	0,1998	0,2843	4,5-6 MeV
	27,85	0,2378	0,2548	4,5-6 MeV
	36,75	0,6811	0,7256	4,5-6 MeV
	74,33	0,5952	0,6338	4,5-6 MeV

Tabla 208. Coeficientes de regresión exponencial de las cuentas en función de la masa, para distintas leyes y distintos intervalos de energía..

De las 48 comparaciones realizadas para distintas funciones de correlación y para distintas leyes, tanto si las realizamos con la media de los valores de las medidas como si lo realizamos con todas las medidas, se tiene que 45 veces resulta mejor el intervalo más estrecho de energías, y solamente tres veces se tiene menor correlación en el intervalo más amplio de energías.

Como consecuencia de ello se concluye que se obtienen mejores coeficientes de correlación para el intervalo más estrecho de energías, es decir, entre 4,5 y 6 MeV. que para el intervalo más amplio, 4,5 – 6,5 MeV.

En la Tabla 209 se ha expuesto la mejor función de regresión para cada una de las leyes, y en el intervalo de energía más estrecho, de 4,5 a 6 MeV.

	Ley	Función Mejor correlación	
		1er puesto	2º Puesto
Media de los puntos	4,2	Poli 3	Poli 2
	27,85	Poli 3	Poli 2
	36,75	Poli 3	Poli 2
	74,33	Poli 3	**Logarítmica**
	Ley	Función Mejor correlación	
todos los puntos	4,2	Poli 3	Poli 2
	27,85	Poli 3	Poli 2
	36,75	**Potencial**	poli3-2
	74,33	Poli 3	**Potencial**

Tabla 209. Función que obtiene los mejores coeficientes de regresión de los valores de las cuentas según la ley para el intervalo 4,5 – 6 MeV..

Se aprecia que la mejor función de correlación es polinómica de tercer grado en siete de las ocho comparaciones y el segundo mejor

ajuste correspondería a una polinómica de segundo grado en seis de las ocho comparaciones. Se concluye, en consecuencia, que el ajuste polinómico sería el que mejor se adaptaría.

7.4. Análisis a través de modelos.

Para realizar un estudio riguroso de los datos se debe comenzar por modelizar la señal (rayos gamma), que llega a un detector procedente de la activación con neutrones de una muestra de fluorita.

El modelo tiene que incluir dos fenómenos simultáneos:

- Por una parte debe considerar el efecto de la disminución del flujo de neutrones con la distancia a la fuente de neutrones,
- Por otra parte, los átomos de flúor debido a la activación, acaban emitiendo rayos gamma, y éstos en su recorrido hasta el detector, se atenúan de forma exponencial dependiendo de un coeficiente de atenuación característico de la muestra.

La ecuación representativa del modelo se contrastará con los resultados de los ensayos reflejados en Tabla 189, Tabla 190, Tabla 191, Tabla 192 y Tabla 193.

Para conocer la forma de la ecuación se han hecho tres modelos sencillos que responden a las Figura 467 y Figura 474, con las siguientes consideraciones generales:

- Se supone la muestra según la Figura 467, a una distancia "a" de la fuente cuando se está irradiando, y a una distancia "b" del detector en la fase de medida.
- Los neutrones salen de la fuente y atraviesan el espacio "a" de aire, llegan a la muestra e interaccionan o no con la muestra.
- Cuando se producen rayos gamma, éstos atraviesan la muestra y llegan al detector.

Las aproximaciones al modelo general son las siguientes:

- En una primera aproximación, se considera el efecto de reducción del flujo de neutrones con la distancia, mientras que se supone que los rayos gamma pasan al detector sin sufrir ninguna atenuación. El flujo de neutrones en un volumen de la muestra situado a una distancia dada de la fuente, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la misma.
- En una segunda aproximación se considera que el flujo de neutrones es constante en toda la muestra, pero que los rayos gamma se atenúan en su recorrido hasta el detector, siguiendo una ley exponencial.
- En un tercer modelo, el modelo global, se unen los dos modelos anteriores, y, en consecuencia, se considera que el flujo de neutrones se reduce con una ley inversamente proporcional al cuadrado de la distancia,

y por otra parte los rayos gamma se atenúan en su recorrido al detector siguiendo una ley exponencial.

En los siguientes apartados se discuten los tres modelos para determinar la forma a la que se debe ajustar el número de cuentas leídas sobre una muestra de fluorita activada con neutrones, al cambiar la masa y la ley de la muestra.

En todos los casos, se ha considerado que la densidad de la fluorita es ρ_1 y la del estéril es ρ_2. Por tanto se cumple que,

$$l = \frac{m}{\left(\rho_1 . y + \rho_2 (1 - y)\right) \cdot S} \qquad [11]$$

donde,

$y =$ ley de la fluorita en tanto por uno.

$m =$ masa de la muestra, en g/cm^3.

$S =$ sección transversal del contenedor de la muestra, en cm^2.

$l =$ altura de la muestra en cm.

7.4.1. Primer modelo.

[1] Hipótesis de partida.

Para este modelo se suponen las siguientes hipótesis:

- Se ha considerado una geometría unidimensional, con el eje x en la dirección que se aprecia en la Figura 467.
- Suponemos que la activación de un elemento diferencial de muestra solo depende de la distancia *(x+a)* en la dirección *x* a la fuente, y que
- la relación de dependencia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del elemento diferencial al centro de la fuente,
- los rayos gamma no se atenúan con la distancia.

[2] Configuración geométrica.

Se ha utilizado la siguiente configuración geométrica Figura 467:

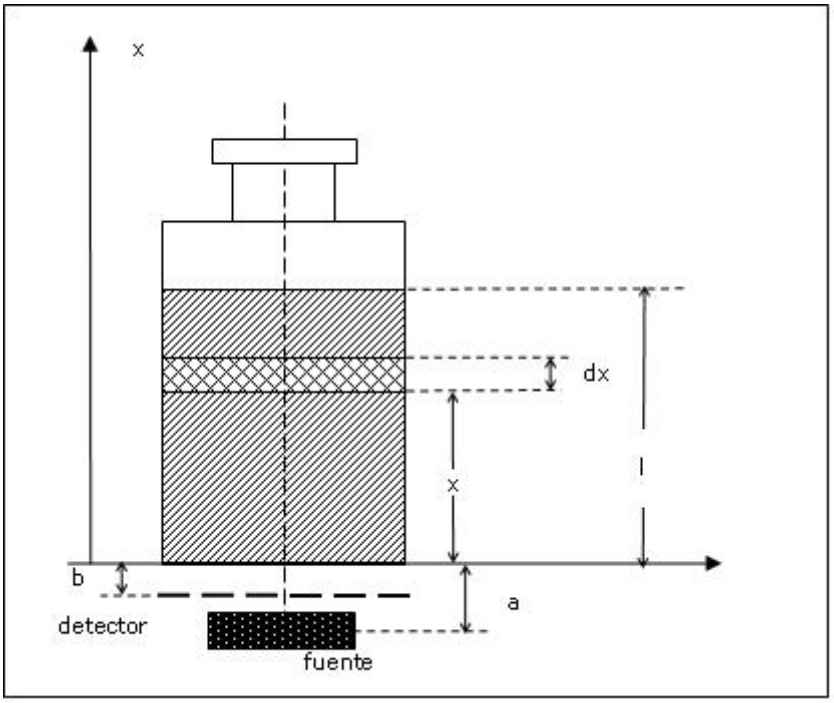


Figura 467. Consideraciones geométricas para el primer y segundo modelo.

[3] Definición matemática del modelo.

El número de cuentas "C" en un intervalo de energía determinado y en un tiempo determinado, que llegan al detector por el efecto de la activación neutrónica, se calcula a partir de la integral de las cuentas que llegan de un elemento diferencial:

- situado a una distancia x
- de altura dx de la muestra
- que varía desde que x=0 hasta que x=l y
- es proporcional al número de átomos excitados que se producen en dicho volumen. Podemos expresar esta proporcionalidad con la siguiente expresión:

$$dC_{px}\ (\text{producidos en x}) = k * dN_{ax}$$

donde dN_{ax} es el número de átomos de flúor excitados en la posición x.

Pero dN_{ax} es también proporcional al número de átomos de flúor presentes en este volumen de muestra dN_{fx} y al flujo de neutrones que llegan desde la fuente ϕ_{nx}.

$$dN_{ax} = k' \cdot dN_{fx} \cdot \phi_{nx}$$

Según la hipótesis de partida para este modelo, el flujo de neutrones es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia $(x+a)$

$$\phi_{nx} = \frac{k''}{(x+a)^2}$$

por lo que se puede expresar el número de cuentas producidas en dicho volumen como:

$$dC_{px} = k * k' * dN_{fx} * \frac{k''}{(x+a)^2}$$

donde dN_f.es el número de átomos de flúor presentes en la muestra en el volumen que tiene como base la sección del contenedor de la muestra S y como altura dx.

De la misma manera, dN_{fx} es proporcional al producto de la ley y por la masa dm del elemento diferencial en consideración.

$$dN_{fx} = k''' \cdot y \cdot dm$$

Si llamamos,

$$k_1 = k * k' * k'' * k'''$$

Y sustituyendo,

$$dC_{px} = k * k' * k'' * k''' \cdot \frac{y \cdot dm}{(x+a)^2} = k_1 \cdot \frac{y \cdot dm}{(x+a)^2}$$

Si expresamos dm como el producto del:

- volumen, es decir $S \cdot dx$,
- por la densidad de la muestra ρ_m, y ésta en función de la ley y, y de la densidad de la fluorita ρ_1 y del estéril, ρ_2, tenemos que, $\rho_m = \rho_1 \cdot y + \rho_2(1-y)$

se obtiene la expresión siguiente:

$$dC_{px}\ (\text{producidas en x}) = k_1 \frac{y \cdot S \cdot (\rho_1 \cdot y + \rho_2 - \rho_2 \cdot y)}{(x+a)^2} dx$$

En este modelo se considera que los rayos gamma producidos en la muestra llegan todos al detector, por lo que, la lectura dC de las cuentas procedentes de la muestra situada a una distancia x, es,

$$dC\ (\text{leídas en el detector}) = dC_{px}\ (\text{producidas en x})$$

Es decir,

$$dC\ (\text{leídas en el detector}) = k_1 \frac{y \cdot S \cdot (\rho_1 \cdot y + \rho_2 - \rho_2 \cdot y)}{(x+a)^2} dx$$

que se puede expresar, agrupando las constantes en la ecuación,

$$dC = k_1 \frac{S \cdot \rho_1 \cdot y^2 + y \cdot S \cdot \rho_2 - S \cdot \rho_2 \cdot y^2}{(x+a)^2} dx$$

es decir,

$$dC = k_1 \frac{y^2(S \cdot \rho_1 - S \cdot \rho_2) + S \cdot \rho_2 \cdot y}{(x+a)^2} dx$$

Llamando,

$$Q = S*(\rho_1 - \rho_2)$$

y

$$P = S*\rho_2$$

se llega a la ecuación,

$$dC = k_1 \frac{y^2 Q + P \cdot y}{(x+a)^2} dx$$

Que se tiene que integrar entre que x es 0 hasta el valor l. Suponemos que la ley es uniforme en la muestra, por lo que,

$$C = k_1 * \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right) \int_0^l \frac{dx}{(x+a)^2} \quad [12]$$

donde,

- C es la integral de las cuentas procedentes de la muestra en un rango de canales determinado para este primer modelo,
- P y Q son constantes y sus valores son mayores que cero,
- *a* es la distancia entre la fuente y la base de la muestra,
- *y* es la ley de la fluorita en la muestra en tanto por uno.

Integrando la expresión del segundo término se tiene,

$$C = k_1 * \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right) * \frac{l}{(l+a) \cdot a}$$

l es la altura de la muestra que se puede expresar en términos de los parámetros anteriormente ya que, por un lado la altura es la relación entre el volumen y la superficie de la muestra,

$$l = \frac{V}{S}$$

y por otra el volumen es igual a la masa dividida por densidad que, a su vez se puede expresar como se vio anteriormente en función de la ley en fluorita de las densidades de la fluorita y el estéril,

$$V = \frac{m}{\rho_m},$$

luego,

$$l = \frac{m}{(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)) \cdot S}$$

se tiene que,

$$C = k_1 * \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right) \frac{\dfrac{m}{\left(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)\right) \cdot S}}{\left(\dfrac{m}{\left(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)\right) \cdot S} + a\right) \cdot a}$$

de donde,

$$C = k_1 * \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right) \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{\dfrac{m}{\left(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)\right) \cdot S}}{\left(\dfrac{m + a \cdot \left(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)\right) \cdot S}{\left(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)\right) \cdot S}\right)}.$$

por lo que,

$$C = \cdot k_1 * \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right) \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{m}{m + a \cdot \left(\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)\right) \cdot S \cdot}$$

y,

$$C = \frac{k_1 \cdot m \cdot \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right)}{a \cdot \left(m + Q \cdot a \cdot y + P \cdot a\right)}$$

Estas cuentas son las que proceden de la muestra, pero a ellas hay que sumarle las cuentas correspondientes de un fondo, con lo que la ecuación anterior se puede expresar, introduciendo ya el total de las cuentas de este primer modelo C_1

$$C_1 = \frac{k_1 \cdot m \cdot \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right)}{a \cdot \left(m + Q \cdot a \cdot y + P \cdot a\right)} + F \qquad \textbf{[13]}$$

donde,

P y Q tienen dimensiones de masa por unidad de longitud.

La determinación de los coeficientes se realiza a partir de los ensayos en los que se ha ido activando distintas masas de muestras de leyes distintas tal y cuyos resultados se reflejan en las Tabla 189 a la Tabla 193.

Se ha optado por analizar separadamente los coeficientes en situaciones diferentes:

- tomando el intervalo de energía
  - entre 4,5 y 6 MeV
  - entre 4,5 y 6,5 MeV.
- Y respecto a la masa, tomando,
  - todos los valores obtenidos con una masa.
  - La media de los valores para una masa.

Una representación de esta superficie es un gráfico en tres dimensiones cuyos ejes X e Y son la masa y la ley y el eje Z son las cuentas.

Se ha intentado utilizar la herramienta de regresión del programa MATLAB, pero se ha encontrado el inconveniente de que solo permite hacer análisis de una variable.

De esta forma, se hicieron análisis de la ecuación considerando en primer lugar la ley "y" constante, y posteriormente la masa "m" constante.

La fórmula anterior adquiría en este caso las distintas formas:

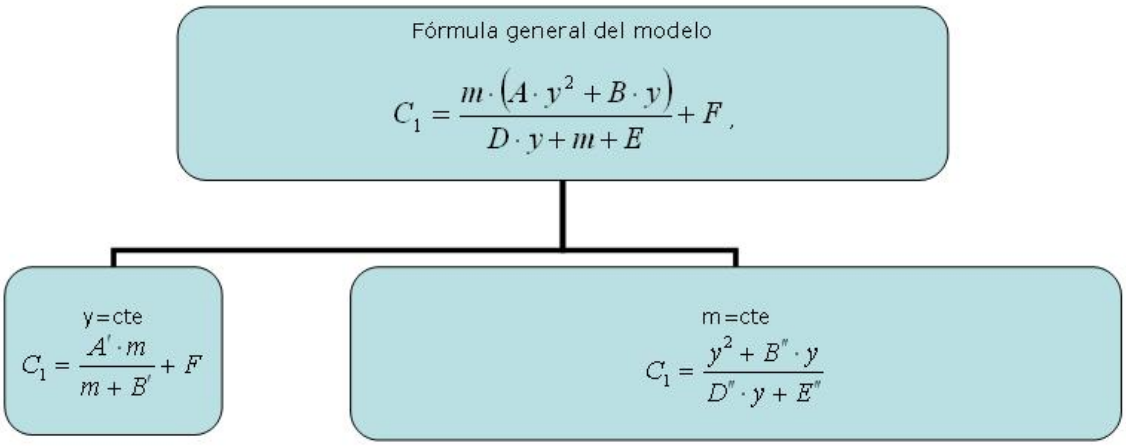


Figura 468. Análisis del modelo según MATLAB.

Se calcularon los coeficientes que aparecen en las fórmulas, y se obtuvieron los siguientes resultados:

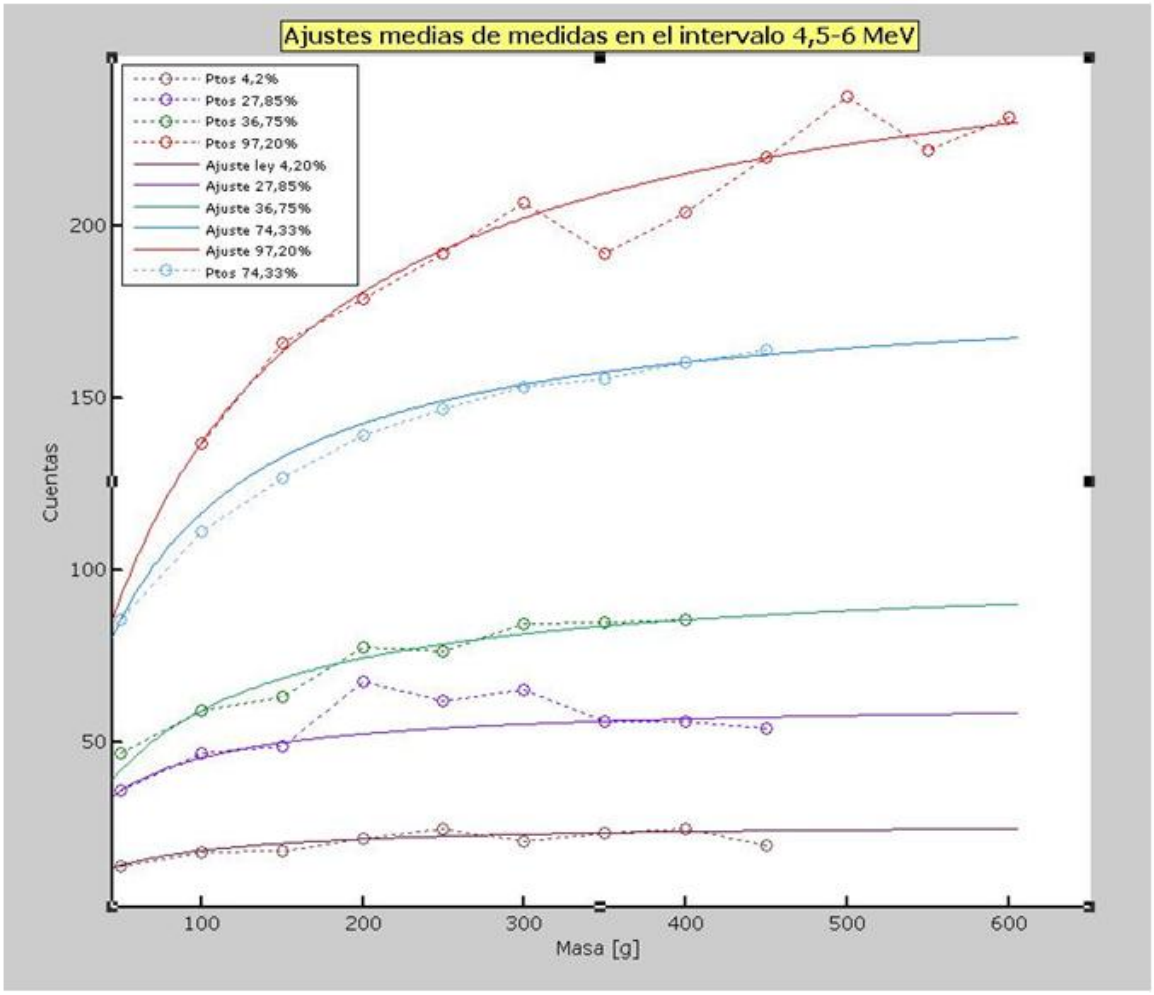


Figura 469. Ajustes de las medias a la ecuación $C_1 = \frac{A' \cdot m}{m + B'}$ para el intervalo de energía indicado (ley constante).

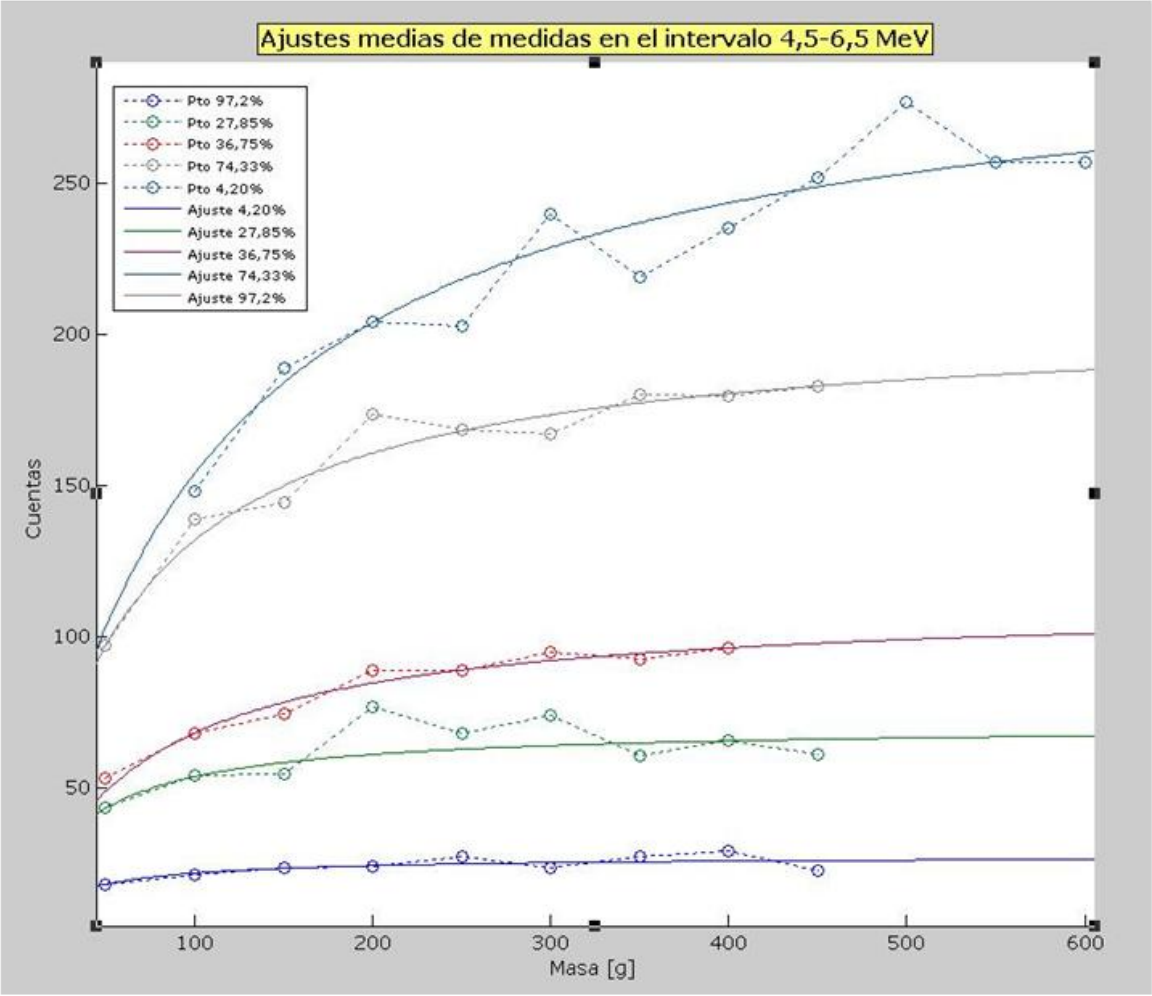


Figura 470. Ajustes de las medias a la ecuación $C_1 = \frac{A' \cdot m}{m + B'}$ en el intervalo de energía indicado. (ley constante).

Para masas constantes, se obtuvieron las siguientes gráficas: (las representaciones de las gráficas se hicieron en EXCEL con los resultados extraídos de MATLAB).

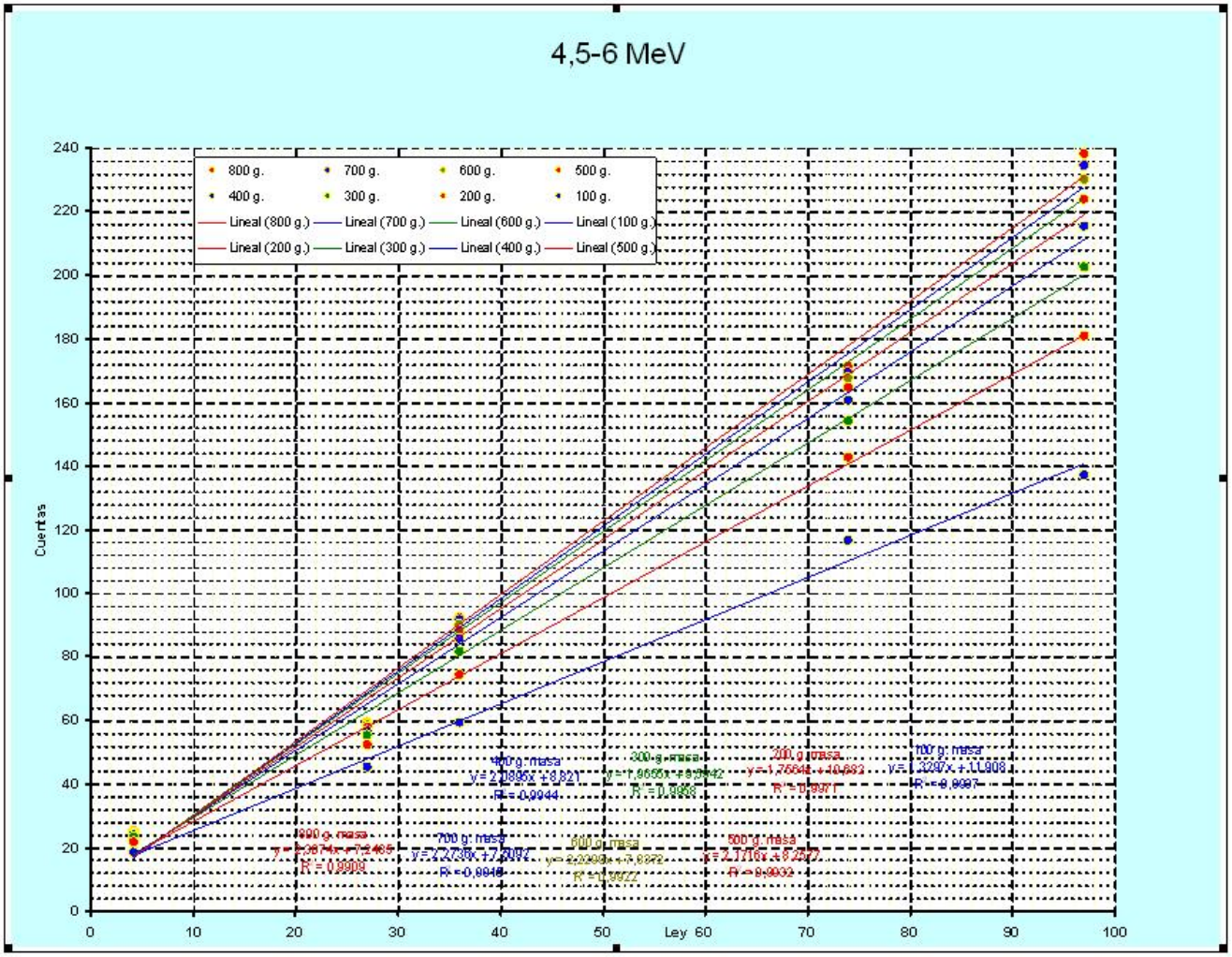


Figura 471. Representación en EXCEL de las cuentas para distintas leyes con masas constantes. Intervalo de energías 4,5-6 MeV.

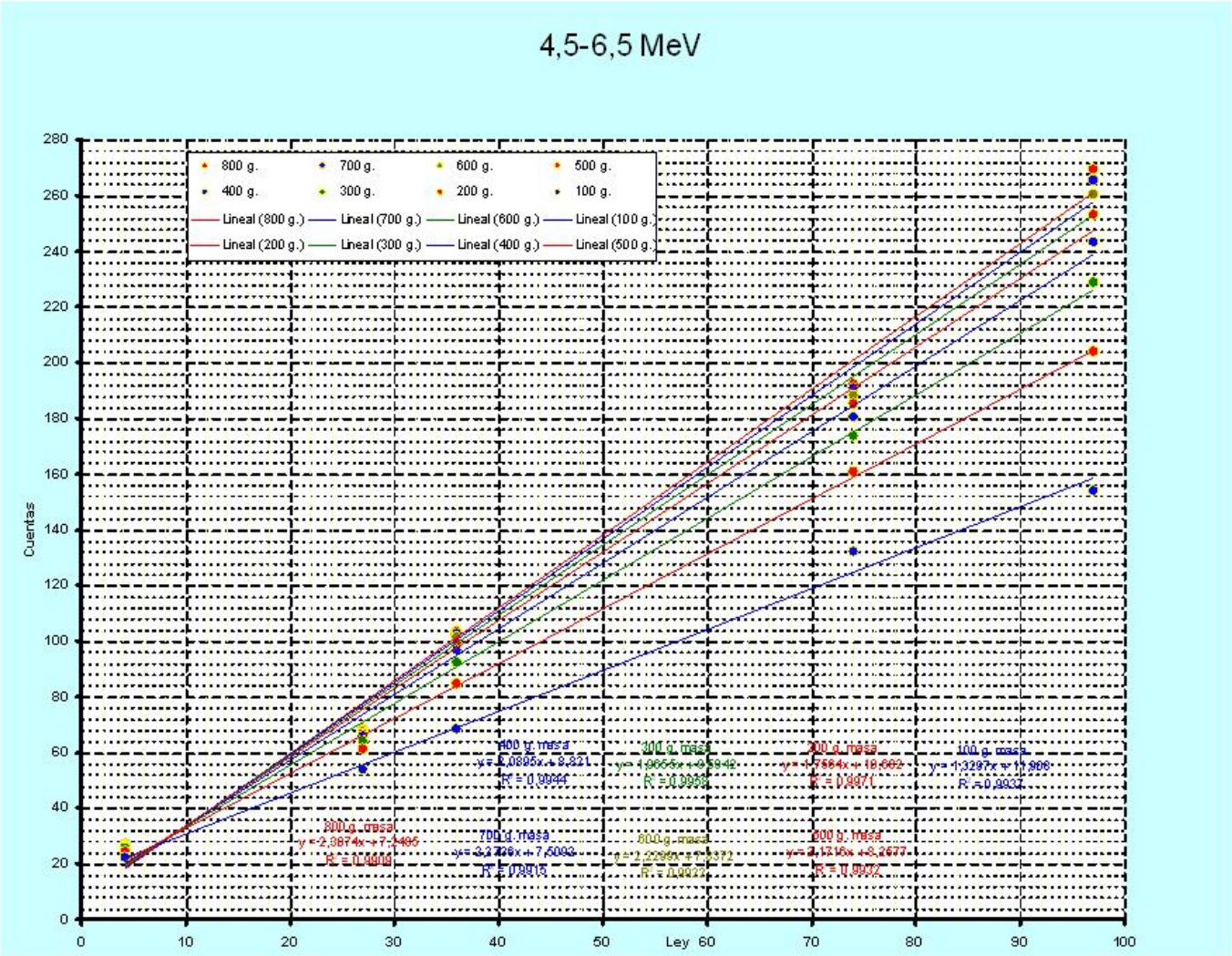


Figura 472. Curvas en abanico. Representación en EXCEL de las cuentas para distintas leyes con masas constantes. Intervalo de energías 4,5-6,5 MeV.

Finalmente, la superficie se representó en MATLAB con los valores de los coeficientes extraídos en ambas fases y se consiguió la superficie de la figura siguiente:

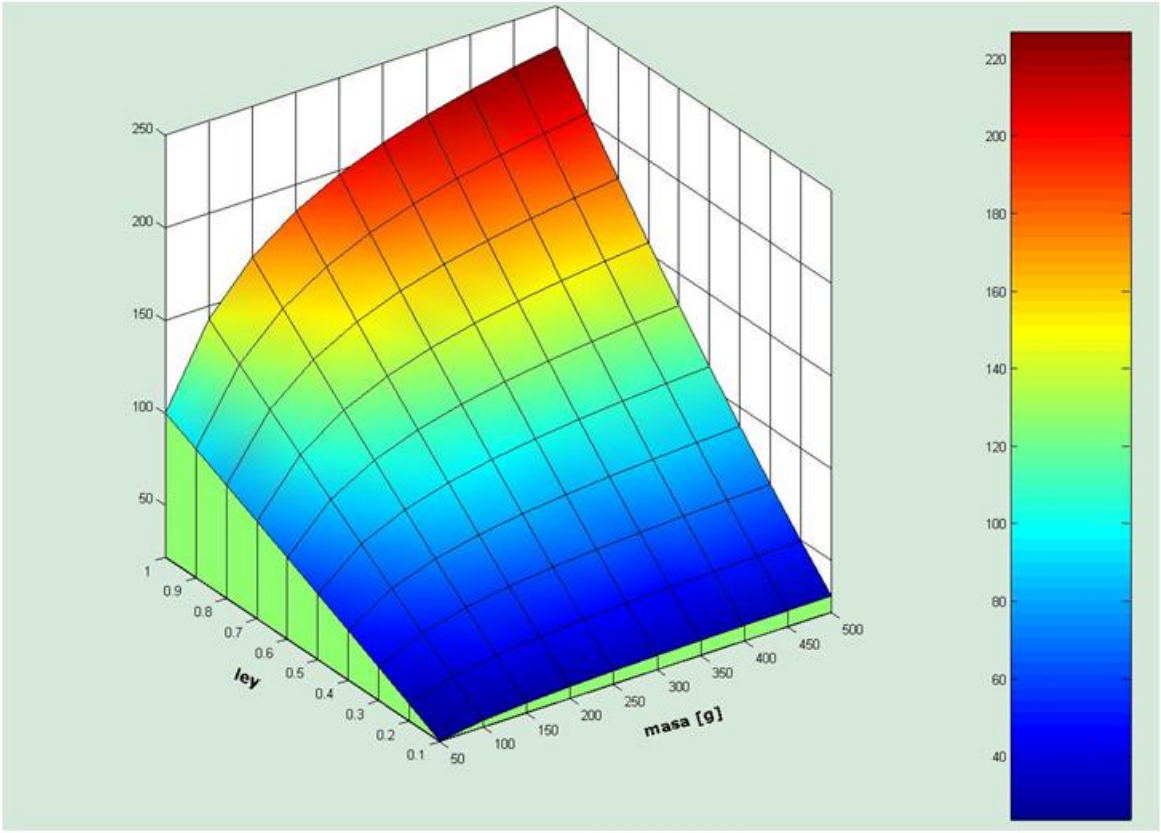


Figura 473. Representación de la ecuación en el estudio llevado con MATLAB.

El empleo de este programa era complejo y con la regresión para el tercer modelo se hizo tan laborioso que se optó por utilizar la herramienta "regresión no lineal" del programa de estadística SPSS, más adaptado al problema.

En cualquier caso, los algoritmos de cálculo utilizados por los programas estadísticos para hacer regresiones no lineales son procesos iterativos que requieren la asignación de unos valores de partida para los coeficientes.

Además, estos procesos están muy influenciados por los parámetros iniciales, de forma que una mala elección de los mismos puede dar lugar a malas soluciones, a que el proceso no converja o bien que de lugar a soluciones locales que no son la solución buscada.

Para estimar los valores de los parámetros de partida de la ecuación [13] que se reproduce a continuación,

$$C_1 = \frac{k_1 \cdot m \cdot \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y\right)}{a \cdot \left(m + Q \cdot a \cdot y + P \cdot a\right)} + F$$

- Consideramos la densidad aparente de la fluorita oscilando entre 1,5 y 1,9 gr/cm^3 y la del estéril entre 1,1 y 1,4, por lo que,

- P oscila entre 30 y 50. tomando como valor para el inicio de las iteraciones P → 45
- Q entre 3 y 16. Valor inicial → 9,6

- Para no resultar excesivamente restrictivos en las constantes del modelo, se le permite que F varíara entre 10 y 25. Valor inicial F → 13
- Para el parámetro "a" se siguió el mismo criterio que para el F variando entre 0,5 y 8 cm. Valor inicial F → 2 cm.
- estimamos para empezar el proceso, $k_1 = 1$

Con estas condiciones de partida, que se introducen en la fila de procesamiento 0 de la Tabla 210, se establece la regresión en SPSS entre los distintos tipos de datos mencionados anteriormente, y obtenemos unos parámetros que se han representado en la misma tabla en la fila procesamiento nº 1. El coeficiente de correlación es de 0,994.

Se hace otro proceso de cálculo introduciendo como datos de inicio los resultados del primer procesamiento, y obtenemos los resultados que expresamos en procesamiento 2.

Se repitió el proceso hasta que se estabilizan los valores.

En la tabla siguiente se exponen los valores de los coeficientes según los resultados de la regresión no lineal realizada a partir de los datos medios para cada masa en el intervalo de energía del espectro entre 4,5 y 6 MeV (Tabla 210).

Nº de procesamiento	k_1	a	Q	P	F	Coeficiente de correlación
0	1	2	9,6	45	13	0
1	9,541	1,808	7,616	39,498	13,598	0,994
2	9,798	1,832	7,515	38,978	13,598	0,994

Tabla 210.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando los valores medios del intervalo de energía entre 4,5 y 6 MeV.

A continuación se repite el proceso considerando el intervalo de energía más amplio e introduciendo como datos de los parámetros los extraídos de la regresión anterior. Sus resultados se observan en la Tabla 211.

Nº de procesamiento	k_1	a	Q	P	F	Coeficiente de correlación
0	9,798	1,832	7,515	38,978	13,598	0
1	11,002	1,874	10,182	38,363	17,385	0,992

Tabla 211.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando los valores medios del intervalo de energía entre 4,5 y 6,5 MeV.

Se observa que el fondo aumenta lo cual es razonable puesto que se ha aumentado el espectro de energías leído, y que los parámetros que no dependen de la energía permanecen aproximadamente constantes.

A continuación se representan detalladamente estos coeficientes:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		K2	a	Q	P	F
0.5	468244,469	1,000	2,000	9,600	45,000	13,000
1.3	1758,818	9,713	2,000	9,601	45,000	13,001
2.2	1752,391	9,711	1,997	9,588	44,973	13,013
3.3	1486,421	9,564	1,861	7,511	40,252	15,216
4.4	1432,225	9,582	1,806	8,246	37,926	14,033
5.2	1393,039	9,471	1,797	9,012	37,901	14,442
6.1	1384,757	9,521	1,793	7,457	39,178	13,624
7.1	1383,107	9,551	1,812	7,680	39,562	13,552
8.1	1382,800	9,541	1,808	7,618	39,492	13,597
9.1	1382,799	9,541	1,808	7,616	39,498	13,597
10.1	1382,799	9,541	1,808	7,616	39,498	13,598

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 10 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 212. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. Número de iteración 1.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
K2	9,541	9097224,2	-18372207,5	2E+007
a	1,808	861912,11	-1740665,007	1740669
Q	7,616	3630744,6	-7332429,857	7332445
P	39,498	18830429	-38028782,7	4E+007
F	13,598	2,046	9,465	17,730

Tabla 213. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Número de iteración 1.

	K2	a	Q	P	F
K2	1,000	1,000	-1,000	-1,000	,053
a	1,000	1,000	-1,000	-1,000	,053
Q	-1,000	-1,000	1,000	1,000	-,053
P	-1,000	-1,000	1,000	1,000	-,053
F	,053	,053	-,053	-,053	1,000

Tabla 214. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Número de iteración 1.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	694324,430	5	138864,886
Residual	1382,799	41	33,727
Total sin corrección	695707,229	46	
Total corregido	216902,204	45	

Variable dependiente: Cuentas_media_p

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,994.

Tabla 215. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Número de iteración 1.

Los resultados del segundo procesamiento son los siguientes:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		K2	a	Q	P	F
0.5	1417,712	9,500	1,800	7,600	39,000	13,600
1.7	1384,061	9,575	1,800	7,601	39,001	13,601
2.9	1382,929	9,700	1,820	7,611	39,013	13,595
3.1	1382,888	9,724	1,823	7,577	39,007	13,634
4.1	1382,835	9,790	1,829	7,461	38,974	13,577
5.1	1382,814	9,814	1,835	7,554	38,942	13,616
6.1	1382,800	9,790	1,831	7,515	38,998	13,596
7.1	1382,799	9,802	1,832	7,514	38,965	13,598
8.1	1382,799	9,797	1,832	7,516	38,978	13,598
9.1	1382,799	9,798	1,832	7,515	38,978	13,598

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 9 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 216. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. Número de iteración 2.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
K2	9,798	12647877	-25542896,2	3E+007
a	1,832	1182521,8	-2388149,333	2388153
Q	7,515	4850842,2	-9796467,033	9796482
P	38,978	25158285	-50808149,3	5E+007
F	13,598	2,061	9,435	17,760

Tabla 217. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Número de iteración 2.

	K2	a	Q	P	F
K2	1,000	1,000	-1,000	-1,000	-,131
a	1,000	1,000	-1,000	-1,000	-,131
Q	-1,000	-1,000	1,000	1,000	,131
P	-1,000	-1,000	1,000	1,000	,131
F	-,131	-,131	,131	,131	1,000

Tabla 218. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Número de iteración 2.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	694324,430	5	138864,886
Residual	1382,799	41	33,727
Total sin corrección	695707,229	46	
Total corregido	216902,204	45	

Variable dependiente: Cuentas_media_p

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,994.

Tabla 219. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Número de iteración 2.

Considerando ahora la misma metodología para el intervalo de energías comprendido entre 4,5 y 6,5 MeV, se obtiene lo siguiente:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		K2	a	Q	P	F
0.5	15379,426	9,798	1,832	7,515	38,978	13,598
1.8	2459,458	11,265	1,832	7,516	38,979	13,599
2.3	2458,914	11,376	1,849	7,503	38,996	13,617
3.9	2387,179	11,133	1,870	6,458	41,550	15,098
4.3	2356,347	11,252	1,859	7,820	38,749	16,287
5.3	2330,047	11,018	1,882	10,257	38,462	17,393
6.1	2329,355	11,012	1,875	10,206	38,311	17,385
7.1	2329,308	11,004	1,874	10,155	38,375	17,374
8.1	2329,305	11,002	1,874	10,178	38,362	17,383
9.1	2329,305	11,002	1,874	10,182	38,363	17,385
10.1	2329,305	11,002	1,874	10,182	38,363	17,385

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 10 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 220. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Historial de iteraciones.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
K2	11,002	18924336	-38218460,3	4E+007
a	1,874	1612112,8	-3255725,928	3255730
Q	10,182	8757039,8	-17685190,5	2E+007
P	38,363	32993269	-66631221,1	7E+007
F	17,385	2,661	12,011	22,758

Tabla 221. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimaciones de los parámetros.

	K2	a	Q	P	F
K2	1,000	1,000	-1,000	-1,000	-,096
a	1,000	1,000	-1,000	-1,000	-,096
Q	-1,000	-1,000	1,000	1,000	,096
P	-1,000	-1,000	1,000	1,000	,096
F	-,096	-,096	,096	,096	1,000

Tabla 222. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	897590,883	5	179518,177
Residual	2329,305	41	56,812
Total sin corrección	899920,187	46	
Total corregido	279222,325	45	

Variable dependiente: Cuentas_media_G

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,992.

Tabla 223. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA

La diferencia entre las cuentas leídas y las cuentas calculadas por el modelo en los diferentes intervalos de energía, se reflejan en la siguiente tabla.

Masa	Ley	Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
		Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia de cuentas entre real-predicción	Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia de cuentas entre real-predicción
50	0,042	14	17,22	-3,22	18,33	21,28	-2,95
100	0,042	17,67	18,73	-1,06	21,33	22,92	-1,59
150	0,042	18,33	19,56	-1,23	23,67	23,83	-0,16
200	0,042	21,67	20,09	1,58	24,33	24,4	-0,06
250	0,042	24,5	20,45	4,05	27,75	24,79	2,96
300	0,042	21	20,72	0,28	23,75	25,08	-1,33
350	0,042	23,5	20,92	2,58	27,75	25,3	2,45
400	0,042	24,75	21,08	3,67	29,5	25,48	4,02
450	0,042	19,75	21,21	-1,46	23	25,62	-2,62
50	0,2785	35,75	38,02	-2,27	43,5	43,85	-0,35
100	0,2785	46,67	48,5	-1,84	54,33	55,38	-1,05
150	0,2785	48,67	54,33	-5,67	54,67	61,84	-7,17
200	0,2785	67,33	58,05	9,29	77	65,97	11,03
250	0,2785	62	60,62	1,38	68	68,84	-0,84
300	0,2785	65	62,5	2,5	74	70,94	3,06
350	0,2785	56	63,94	-7,94	61	72,56	-11,56
400	0,2785	56	65,08	-9,08	65,75	73,83	-8,08
450	0,2785	53,75	66	-12,25	61,25	74,87	-13,62
50	0,3675	46,75	46,03	0,72	53,5	52,61	0,89
100	0,3675	59	60,08	-1,08	68,33	68,14	0,19
150	0,3675	63	67,93	-4,93	74,5	76,89	-2,39
200	0,3675	77,5	72,94	4,56	89	82,51	6,49
250	0,3675	76,5	76,42	0,08	89	86,41	2,59
300	0,3675	84,5	78,97	5,53	95	89,29	5,71
350	0,3675	84,75	80,92	3,83	92,5	91,49	1,01
400	0,3675	85,5	82,46	3,04	96,5	93,24	3,26
50	0,7433	85,5	80,88	4,62	97,25	91	6,25
100	0,7433	120,5	111,12	9,38	139	125,06	13,94
150	0,7433	127	128,31	-1,31	144,75	144,7	0,05
200	0,7433	151,75	139,39	12,36	173,5	157,47	16,03
250	0,7433	149,25	147,13	2,12	168,5	166,44	2,06
300	0,7433	148	152,85	-4,85	167,33	173,09	-5,75
350	0,7433	158	157,24	0,76	180,33	178,21	2,12
400	0,7433	159	160,71	-1,71	179,5	182,28	-2,78
450	0,7433	164,25	163,54	0,71	183	185,59	-2,59
100	0,972	137	143,79	-6,79	149	161,94	-12,94
150	0,972	166	167,3	-1,3	189	189,13	-0,13
200	0,972	179	182,55	-3,55	206	206,96	-0,96
250	0,972	192	193,25	-1,25	204	219,56	-15,56

Masa	Ley	Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
		Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia de cuentas entre real-predicción	Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia de cuentas entre real-predicción
300	0,972	207	201,16	5,84	240	228,92	11,08
350	0,972	192	207,26	-15,26	219	236,16	-17,16
400	0,972	204	212,1	-8,1	235	241,93	-6,93
450	0,972	220	216,03	3,97	253	246,63	6,37
500	0,972	225	219,3	5,7	262	250,53	11,47
550	0,972	222	222,04	-0,04	257	253,82	3,18
600	0,972	232	224,39	7,61	259	256,64	2,36

Tabla 224. Datos de partida y valores predichos por el primer modelo para los valores medios en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV

Se ha repetido el procedimiento utilizando todos los valores leídos en lugar de utilizar las medias de los valores. En este caso, en la tabla siguiente se exponen los valores de los coeficientes según los resultados de la regresión no lineal realizada a partir de los todos los datos de cada muestra de igual masa, en el intervalo de energía del espectro entre 4,5 y 6 MeV (Tabla 225).

Nº de procesado	k_1	a	Q	P	F	Coeficiente de correlación
0	9	1,8	10	39	13	0
1	7,816	1,558	8,773	40,089	13,349	0,978
2	7,819	1,558	8,773	40,089	13,349	0,978

Tabla 225.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando todos los valores del intervalo de energía entre 4,5 y 6 MeV.

A continuación se repite el proceso considerando el intervalo de energía más amplio e introduciendo como datos de los parámetros los extraídos de la regresión anterior. Sus resultados se observan en la Tabla 226

Nº de procesado	k_1	a	Q	P	F	Coeficiente de correlación
0	7,819	1,558	8,773	40,089	13,349	0
1	8,748	1,551	18,821	38,337	16,776	0,977

Tabla 226.Estimación de los coeficientes del primer modelo considerando todos los valores del intervalo de energía entre 4,5 y 6,5 MeV.

Se exponen a continuación detalladamente estos resultados de la regresión. Solo se muestran las tablas correspondientes al segundo procesamiento de la Tabla 225.

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		k2	a	Q	P	F
0.4	9715,355	7,816	1,558	8,773	40,089	13,349
1.3	9715,305	7,817	1,558	8,773	40,089	13,349
2.8	9715,305	7,816	1,558	8,773	40,089	13,349
3.1	9715,268	7,820	1,559	8,766	40,088	13,367
4.1	9715,216	7,819	1,558	8,772	40,082	13,350
5.1	9715,216	7,819	1,558	8,772	40,082	13,349

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 5 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 227. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
k2	7,819	6911168,6	-13668156,9	1E+007
a	1,558	688502,22	-1361643,971	1361647
Q	8,772	3876653,0	-7666817,941	7666835
P	40,082	17714614	-35034014,8	4E+007
F	13,349	1,645	10,095	16,604

Tabla 228. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros.

.

	k2	a	Q	P	F
k2	1,000	1,000	-1,000	-1,000	,125
a	1,000	1,000	-1,000	-1,000	,125
Q	-1,000	-1,000	1,000	1,000	-,125
P	-1,000	-1,000	1,000	1,000	-,125
F	,125	,125	-,125	-,125	1,000

Tabla 229. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	1399117,8	5	279823,557
Residual	9715,216	135	71,965
Total sin corrección	1408833,0	140	
Total corregido	450174,250	139	

Variable dependiente: Cuentas_p

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,978.

Tabla 230. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA.

Si se considera ahora el intervalo amplio de energías, se tiene los resultados siguientes:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		k2	a	Q	P	F
0.5	39348,337	7,816	1,558	8,773	40,089	13,349
1.3	13762,986	9,000	1,558	8,773	40,089	13,349
2.2	13583,106	8,621	1,483	8,364	39,375	14,174
3.3	13455,911	8,935	1,523	8,009	38,753	14,892
4.3	13388,995	8,703	1,537	8,866	39,960	15,977
5.1	13366,474	8,734	1,556	9,834	39,766	16,098
6.2	13343,238	8,730	1,545	10,754	38,313	16,663
7.1	13341,982	8,740	1,550	10,840	38,355	16,775
8.1	13341,932	8,748	1,551	10,819	38,339	16,776
9.1	13341,932	8,748	1,551	10,821	38,337	16,776
10.1	13341,932	8,748	1,551	10,821	38,337	16,776

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 10 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 231. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Historial de iteraciones.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
k2	8,748	7206737,8	-14252700,9	1E+007
a	1,551	638757,09	-1263263,418	1263267
Q	10,821	4457186,6	-8814932,740	8814954
P	38,337	15791684	-31231052,2	3E+007
F	16,776	1,952	12,915	20,636

Tabla 232. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimaciones de los parámetros.

	k2	a	Q	P	F
k2	1,000	1,000	-1,000	-1,000	,188
a	1,000	1,000	-1,000	-1,000	,188
Q	-1,000	-1,000	1,000	1,000	-,188
P	-1,000	-1,000	1,000	1,000	-,188
F	,188	,188	-,188	-,188	1,000

Tabla 233. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	1805027,1	5	361005,414
Residual	13341,932	135	98,829
Total sin corrección	1818369,0	140	
Total corregido	574363,221	139	

Variable dependiente: Cuentas_g

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,977.

Tabla 234. Resultados de la regresión no lineal restringida según el primer modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA

En la tabla siguiente se muestran las diferencias entre las cuentas leídas y las cuentas obtenidas de la ecuación para este modelo, con los coeficientes determinados:

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
50	0,042	16	17,12	-1,12	18	20,95	-2,95
50	0,042	11	17,12	-6,12	16	20,95	-4,95
50	0,042	15	17,12	-2,12	21	20,95	0,05
100	0,042	18	18,58	-0,58	19	22,51	-3,51
100	0,042	19	18,58	0,42	23	22,51	0,49
100	0,042	16	18,58	-2,58	22	22,51	-0,51
150	0,042	20	19,35	0,65	29	23,34	5,66
150	0,042	18	19,35	-1,35	22	23,34	-1,34
150	0,042	17	19,35	-2,35	20	23,34	-3,34
200	0,042	23	19,83	3,17	25	23,84	1,16
200	0,042	22	19,83	2,17	25	23,84	1,16
200	0,042	20	19,83	0,17	23	23,84	-0,84
250	0,042	21	20,16	0,84	23	24,18	-1,18
250	0,042	23	20,16	2,84	28	24,18	3,82
250	0,042	28	20,16	7,84	34	24,18	9,82
250	0,042	26	20,16	5,84	26	24,18	1,82
300	0,042	17	20,4	-3,4	20	24,43	-4,43
300	0,042	20	20,4	-0,4	22	24,43	-2,43
300	0,042	23	20,4	2,6	26	24,43	1,57
300	0,042	24	20,4	3,6	27	24,43	2,57
350	0,042	22	20,58	1,42	27	24,62	2,38
350	0,042	26	20,58	5,42	25	24,62	0,38
350	0,042	24	20,58	3,42	34	24,62	9,38
350	0,042	22	20,58	1,42	25	24,62	0,38
400	0,042	17	20,72	-3,72	21	24,77	-3,77
400	0,042	23	20,72	2,28	26	24,77	1,23
400	0,042	30	20,72	9,28	39	24,77	14,23
400	0,042	29	20,72	8,28	32	24,77	7,23
450	0,042	19	20,83	-1,83	25	24,88	0,12
450	0,042	22	20,83	1,17	23	24,88	-1,88
450	0,042	17	20,83	-3,83	20	24,88	-4,88
450	0,042	21	20,83	0,17	24	24,88	-0,88
50	0,2785	40	38,92	1,08	46	45,24	0,76
50	0,2785	38	38,92	-0,92	47	45,24	1,76
50	0,2785	36	38,92	-2,92	47	45,24	1,76
50	0,2785	29	38,92	-9,92	34	45,24	-11,24
100	0,2785	59	49,1	9,9	70	56,36	13,64
100	0,2785	39	49,1	-10,1	46	56,36	-10,36
100	0,2785	42	49,1	-7,1	47	56,36	-9,36

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
150	0,2785	46	54,58	-8,58	49	62,29	-13,29
150	0,2785	58	54,58	3,42	67	62,29	4,71
150	0,2785	42	54,58	-12,58	48	62,29	-14,29
200	0,2785	79	58	21	88	65,97	22,03
200	0,2785	64	58	6	77	65,97	11,03
200	0,2785	59	58	1	66	65,97	0,03
250	0,2785	61	60,34	0,66	67	68,48	-1,48
250	0,2785	63	60,34	2,66	67	68,48	-1,48
250	0,2785	62	60,34	1,66	70	68,48	1,52
300	0,2785	73	62,04	10,96	80	70,3	9,7
300	0,2785	63	62,04	0,96	72	70,3	1,7
300	0,2785	57	62,04	-5,04	66	70,3	-4,3
300	0,2785	67	62,04	4,96	78	70,3	7,7
350	0,2785	49	63,33	-14,33	56	71,68	-15,68
350	0,2785	51	63,33	-12,33	57	71,68	-14,68
350	0,2785	59	63,33	-4,33	62	71,68	-9,68
350	0,2785	65	63,33	1,67	69	71,68	-2,68
400	0,2785	52	64,34	-12,34	65	72,77	-7,77
400	0,2785	63	64,34	-1,34	70	72,77	-2,77
400	0,2785	50	64,34	-14,34	59	72,77	-13,77
400	0,2785	59	64,34	-5,34	69	72,77	-3,77
450	0,2785	45	65,16	-20,16	54	73,64	-19,64
450	0,2785	56	65,16	-9,16	59	73,64	-14,64
450	0,2785	61	65,16	-4,16	69	73,64	-4,64
450	0,2785	53	65,16	-12,16	63	73,64	-10,64
50	0,3675	48	47,35	0,65	55	54,71	0,29
50	0,3675	50	47,35	2,65	58	54,71	3,29
50	0,3675	48	47,35	0,65	50	54,71	-4,71
50	0,3675	41	47,35	-6,35	51	54,71	-3,71
100	0,3675	55	61,05	-6,05	64	69,74	-5,74
100	0,3675	56	61,05	-5,05	63	69,74	-6,74
100	0,3675	66	61,05	4,95	78	69,74	8,26
150	0,3675	72	68,45	3,55	84	77,8	6,2
150	0,3675	62	68,45	-6,45	76	77,8	-1,8
150	0,3675	63	68,45	-5,45	73	77,8	-4,8
150	0,3675	55	68,45	-13,45	65	77,8	-12,8
200	0,3675	74	73,08	0,92	90	82,83	7,17
200	0,3675	78	73,08	4,92	90	82,83	7,17
200	0,3675	80	73,08	6,92	91	82,83	8,17

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
200	0,3675	78	73,08	4,92	85	82,83	2,17
250	0,3675	72	76,25	-4,25	83	86,26	-3,26
250	0,3675	66	76,25	-10,25	79	86,26	-7,26
250	0,3675	91	76,25	14,75	103	86,26	16,74
250	0,3675	77	76,25	0,75	91	86,26	4,74
300	0,3675	78	78,56	-0,56	87	88,76	-1,76
300	0,3675	100	78,56	21,44	112	88,76	23,24
300	0,3675	74	78,56	-4,56	81	88,76	-7,76
300	0,3675	86	78,56	7,44	100	88,76	11,24
350	0,3675	78	80,32	-2,32	82	90,65	-8,65
350	0,3675	87	80,32	6,68	98	90,65	7,35
350	0,3675	89	80,32	8,68	95	90,65	4,35
350	0,3675	85	80,32	4,68	95	90,65	4,35
400	0,3675	78	81,7	-3,7	92	92,14	-0,14
400	0,3675	81	81,7	-0,7	94	92,14	1,86
400	0,3675	89	81,7	7,3	95	92,14	2,86
400	0,3675	94	81,7	12,3	105	92,14	12,86
50	0,7433	74	84,25	-10,25	82	96,53	-14,53
50	0,7433	94	84,25	9,75	108	96,53	11,47
50	0,7433	83	84,25	-1,25	94	96,53	-2,53
50	0,7433	91	84,25	6,75	105	96,53	8,47
100	0,7433	119	114,08	4,92	142	129,9	12,1
100	0,7433	119	114,08	4,92	133	129,9	3,1
100	0,7433	114	114,08	-0,08	136	129,9	6,1
100	0,7433	130	114,08	15,92	145	129,9	15,1
150	0,7433	116	130,5	-14,5	132	148,23	-16,23
150	0,7433	146	130,5	15,5	171	148,23	22,77
150	0,7433	116	130,5	-14,5	130	148,23	-18,23
150	0,7433	130	130,5	-0,5	146	148,23	-2,23
200	0,7433	163	140,9	22,1	183	159,82	23,18
200	0,7433	150	140,9	9,1	172	159,82	12,18
200	0,7433	143	140,9	2,1	170	159,82	10,18
200	0,7433	151	140,9	10,1	169	159,82	9,18
250	0,7433	157	148,08	8,92	172	167,8	4,2
250	0,7433	137	148,08	-11,08	156	167,8	-11,8
250	0,7433	170	148,08	21,92	199	167,8	31,2
250	0,7433	133	148,08	-15,08	147	167,8	-20,8
300	0,7433	145	153,33	-8,33	165	173,65	-8,65
300	0,7433	148	153,33	-5,33	166	173,65	-7,65

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
300	0,7433	152	153,33	-1,33	171	173,65	-2,65
350	0,7433	158	157,34	0,66	181	178,1	2,9
350	0,7433	160	157,34	2,66	181	178,1	2,9
350	0,7433	157	157,34	-0,34	179	178,1	0,9
400	0,7433	185	160,5	24,5	207	181,61	25,39
400	0,7433	141	160,5	-19,5	159	181,61	-22,61
400	0,7433	150	160,5	-10,5	172	181,61	-9,61
400	0,7433	160	160,5	-0,5	180	181,61	-1,61
450	0,7433	156	163,05	-7,05	177	184,45	-7,45
450	0,7433	160	163,05	-3,05	185	184,45	0,55
450	0,7433	170	163,05	6,95	182	184,45	-2,45
450	0,7433	171	163,05	7,95	188	184,45	3,55
100	0,972	137	148,3	-11,3	149	169,19	-20,19
150	0,972	166	170,93	-4,93	189	194,76	-5,76
200	0,972	179	185,36	-6,36	206	211,06	-5,06
250	0,972	192	195,35	-3,35	204	222,36	-18,36
300	0,972	207	202,69	4,31	240	230,65	9,35
350	0,972	192	208,3	-16,3	219	236,99	-17,99
400	0,972	204	212,74	-8,74	235	242	-7
450	0,972	220	216,33	3,67	253	246,06	6,94
500	0,972	225	219,29	5,71	262	249,41	12,59
550	0,972	222	221,78	0,22	257	252,23	4,77
600	0,972	232	223,91	8,09	259	254,63	4,37

Tabla 235. Datos de partida y valores predichos por el primer modelo para los todos los valores en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV

7.4.2. Segundo modelo.

En este caso se han supuesto las siguientes hipótesis:

- se ha considerado la misma geometría unidimensional que en el primer conjunto y responde a la representación de la Figura 467.
- la activación de un elemento diferencial es uniforme en toda la masa y no depende de la distancia a la fuente.
- los rayos gamma se atenúan con la distancia al detector según una ley exponencial de coeficiente negativo del tipo $y = ae^{-\mu x}$.
- En la posición de lectura de la radiación, el detector se encuentra a una distancia b de la muestra, según se representa en la Figura 467. Este valor de *b* es muy pequeño, despreciable respecto a la altura *l* de la muestra. Este hecho unido a que la atenuación de los rayos gamma en el aire es menor que en la muestra, permite hacer la consideración de que la atenuación solo se lleva a cabo en la masa de la muestra.

En este caso, el número de cuentas "C" en un intervalo de energía determinado que salen de un elemento diferencial de la muestra situado a cota *x* y de espesor *dx,* por el efecto de la activación neutrónica es, como anteriormente:

$$dC_{px}\ (\text{producidos en x}) = k * dN_{ax}$$

donde dN_{ax} es el número de átomos de flúor excitados. Pero dN_{ax} es también proporcional al número de átomos de flúor presentes en este volumen de muestra dN_{fx} y al flujo de neutrones que llegan desde la fuente, que según la hipótesis de partida para este modelo, es constante a lo largo de la muestra ϕ_n.

$$dN_{ax} = k' \cdot dN_{fx} \cdot \phi_n$$

Por lo que se puede expresar el número de cuentas que salen de dicho volumen como:

$$dC_{px}\ (\text{producidos en x}) = k * k' * dN_{fx} * \phi_n$$

donde dN_{fx}.es el número de átomos de flúor presentes en la muestra en el volumen que tiene como base la sección del contenedor de la muestra S y como altura dx.

De la misma manera, dN_{fx} es proporcional al producto de la ley y por la masa dm del elemento diferencial en consideración. Y con los términos empleados en el primer modelo, se puede expresar,

$$dN_{fx} = k''' \cdot y \cdot dm$$

Sustituyendo,

$$dC_{px}\ (\text{producidos en x}) = k * k' * \phi_n * k''' * y * dm$$

Según la hipótesis, los rayos gamma responsables de esta lectura, se atenúan en la muestra, que tiene un coeficiente de atenuación μ, por lo que las cuentas que llegan al detector son,

$$dC\ (\text{leídas por el detector}) = e^{-\mu x} * dC_{px}\ (\text{producidos en x})$$

de este elemento diferencial del que salen dC llegan al detector dC_2 donde, según la hipótesis hecha,

$$dC = e^{-\mu x} \cdot dC_{px} = e^{-\mu x} \cdot k \cdot k' \cdot \phi_n \cdot k''' \cdot y \cdot dm$$

Si llamamos

$$k_2 = k * k' * \phi_n * k'''$$

Y sustituyendo dm como en el caso anterior, tenemos,

$$dC = e^{-\mu x} \cdot k_2 \cdot y \cdot S \cdot (\rho_1 \cdot y + \rho_2 - \rho_2 \cdot y) \cdot dx$$

de donde, para una muestra de ley uniforme y

$$C = k_2 \cdot y \cdot S \cdot (\rho_1 \cdot y + \rho_2 - \rho_2 \cdot y) \int_0^l e^{-\mu . x} \cdot dx$$

que agrupando los términos queda,

$$C = \cdot (k_2 \cdot y \cdot S \cdot \rho_1 \cdot y + k_2 \cdot y \cdot S \cdot \rho_2 - k_2 \cdot y \cdot S \cdot \rho_2 \cdot y) \int_0^l e^{-\mu x} \cdot dx$$

igual a

$$C = \cdot (k_2 \cdot S \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot y^2 + k_2 \cdot S \cdot \rho_2 \cdot y) \int_0^l e^{-\mu x} \cdot dx$$

Por lo que el número de cuentas "C" en un intervalo de energía determinado que llegan al detector por el efecto de la activación neutrónica tendría una expresión como la siguiente:

$$C = \cdot (k_2 \cdot Q \cdot y^2 + k_2 \cdot P \cdot y) \int_0^l e^{-\mu x} \cdot dx \qquad \textbf{[14]}$$

donde μ, k_2 P y Q son constantes.

Resolviendo la integral es:

$$C = (k_2 \cdot Q \cdot y^2 + k_2 \cdot P \cdot y) \frac{1}{\mu} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot l})$$

sustituyendo l en función de m según la [11], queda,

$$C = \left(k_2 \cdot Q \cdot y^2 + k_2 \cdot P \cdot y\right)\frac{1}{\mu} \cdot \left(1 - e^{-\mu \cdot \frac{m}{S \cdot (\rho_1 \cdot y + \rho_2 \cdot (1-y)}}\right)$$

O bien

$$C = \left(k_2 \cdot Q \cdot y^2 + k_2 \cdot P \cdot y\right)\frac{1}{\mu} \cdot \left(1 - e^{-\mu \cdot \frac{m}{Q \cdot y + P}}\right)$$

El número total de cuentas incluyendo el fondo, en este segundo modelo es C_2 que viene determinado por

$$C_2 = \left(k_2 \cdot Q \cdot y^2 + k_2 \cdot P \cdot y\right)\frac{1}{\mu} \cdot \left(1 - e^{-\mu \cdot \frac{m}{Q \cdot y + P}}\right) + F \qquad [15]$$

Como en el caso anterior, se determinan los coeficientes con el programa SPSS, a partir de los ensayos realizados con distintas masas de muestras de diferente ley, y con las mismas opciones respecto a la masa y la energía. Los valores de los coeficientes, y las características de la regresión se reflejan en las tablas siguientes:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		mu	P	Q	K2	F
0.4	9372353,280	,500	39,000	15,000	10,000	13,300
1.3	2104,462	,500	39,000	15,000	1,988	13,300
2.2	2103,672	,500	39,022	14,976	1,991	13,301
3.3	1938,585	,503	43,740	9,829	1,986	13,429
4.1	1938,502	,503	43,748	9,822	1,987	13,431
5.1	1932,359	,504	43,607	10,157	1,984	13,600
6.1	1932,356	,504	43,598	10,131	1,984	13,600
7.1	1932,349	,504	43,592	10,125	1,984	13,600
8.1	1932,133	,504	43,524	10,120	1,988	13,600
9.1	1932,069	,505	43,455	10,123	1,992	13,600
10.1	1932,069	,505	43,455	10,119	1,992	13,600
11.1	1932,069	,505	43,466	10,123	1,992	13,600
12.1	1932,069	,505	43,464	10,122	1,992	13,600

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 12 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 236. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. Primera iteración.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
mu	,505	340812,80	-688284,903	688285,9
P	43,464	29347381	-59268195,2	6E+007
Q	10,122	6834656,6	-13802858,9	1E+007
K2	1,992	,117	1,754	2,229
F	13,600	2,313	8,929	18,271

Tabla 237. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Primera iteración.

	mu	P	Q	K2	F
mu	1,000	1,000	1,000	,336	-,072
P	1,000	1,000	1,000	,336	-,072
Q	1,000	1,000	1,000	,336	-,072
K2	,336	,336	,336	1,000	-,523
F	-,072	-,072	-,072	-,523	1,000

Tabla 238. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Primera iteración.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	693775,161	5	138755,032
Residual	1932,069	41	47,124
Total sin corrección	695707,229	46	
Total corregido	216902,204	45	

Variable dependiente: Cuentas_media_p

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,991.

Tabla 239. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Primera iteración.

En un segundo procesamiento, los resultados obtenidos son:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		mu	P	Q	K2	F
0.2	1932,093	,505	43,464	10,122	1,992	13,600
1.1	1932,085	,505	43,464	10,122	1,992	13,600
2.6	1932,084	,505	43,464	10,122	1,992	13,600
3.1	1932,070	,505	43,487	10,145	1,992	13,600
4.1	1932,069	,505	43,489	10,130	1,992	13,600
5.1	1932,069	,505	43,486	10,127	1,992	13,600
6.1	1932,069	,505	43,486	10,127	1,992	13,600

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 6 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 240. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones. 2ª iteración.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
mu	,505	290791,08	-587263,990	587265,0
P	43,486	25040013	-50569289,4	5E+007
Q	10,127	5831522,2	-11776987,8	1E+007
K2	1,992	,111	1,767	2,216
F	13,600	2,316	8,924	18,276

Tabla 241. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros. Segunda iteración.

	mu	P	Q	K2	F
mu	1,000	1,000	1,000	-,103	-,087
P	1,000	1,000	1,000	-,103	-,087
Q	1,000	1,000	1,000	-,103	-,087
K2	-,103	-,103	-,103	1,000	-,517
F	-,087	-,087	-,087	-,517	1,000

Tabla 242. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros. Segunda iteración.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	693775,161	5	138755,032
Residual	1932,069	41	47,124
Total sin corrección	695707,229	46	
Total corregido	216902,204	45	

Variable dependiente: Cuentas_media_p

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,991.

Tabla 243. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA. Segunda iteración.

Igualmente, ampliando el espectro de energías a 4,5 – 6.5 MeV, se obtiene:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		mu	P	Q	K2	F
0.5	12178,298	,505	43,486	10,127	1,992	17,000
1.1	3101,811	,505	43,486	10,127	2,242	17,000
2.4	3092,409	,502	43,523	10,160	2,231	17,003
3.6	3034,913	,485	40,037	12,877	2,206	17,234
4.2	3029,317	,456	38,125	12,235	2,187	17,285
5.2	3020,966	,485	41,422	12,610	2,161	17,345
6.1	3014,457	,481	40,772	12,828	2,162	17,500
7.1	3014,416	,480	40,680	12,829	2,159	17,500
8.1	3014,416	,480	40,689	12,827	2,159	17,500
9.1	3014,416	,480	40,683	12,826	2,159	17,500
10.1	3014,416	,480	40,685	12,827	2,159	17,500
11.1	3014,416	,480	40,684	12,827	2,159	17,500

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 11 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 244. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Historial de iteraciones.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
mu	,480	316876,64	-639944,883	639945,8
P	40,684	26878631	-54282455,6	5E+007
Q	12,827	8474258,7	-17114099,8	2E+007
K2	2,159	,135	1,887	2,431
F	17,500	2,890	11,663	23,337

Tabla 245. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimación de los parámetros.

	mu	P	Q	K2	F
mu	1,000	1,000	1,000	,224	-,099
P	1,000	1,000	1,000	,224	-,099
Q	1,000	1,000	1,000	,224	-,099
K2	,224	,224	,224	1,000	-,539
F	-,099	-,099	-,099	-,539	1,000

Tabla 246. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	896905,772	5	179381,154
Residual	3014,416	41	73,522
Total sin corrección	899920,187	46	
Total corregido	279222,325	45	

Variable dependiente: Cuentas_media_G

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,989.

Tabla 247. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para los valores medios y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA.

En la siguiente tabla se muestran las diferencias entre las cuentas leídas y las cuentas calculadas según el modelo 2.

Masa	Ley	Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
		Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
50	0,042	14	16,78	-2,78	18,33	20,94	-2,6
100	0,042	17,67	18,57	-0,9	21,33	22,86	-1,53
150	0,042	18,33	19,58	-1,24	23,67	23,93	-0,27
200	0,042	21,67	20,14	1,52	24,33	24,53	-0,2
250	0,042	24,5	20,46	4,04	27,75	24,87	2,88
300	0,042	21	20,64	0,36	23,75	25,06	-1,31
350	0,042	23,5	20,74	2,76	27,75	25,16	2,59
400	0,042	24,75	20,8	3,95	29,5	25,22	4,28
450	0,042	19,75	20,83	-1,08	23	25,25	-2,25
50	0,2785	35,75	34,98	0,77	43,5	40,71	2,79
100	0,2785	46,67	47,37	-0,7	54,33	54,21	0,12
150	0,2785	48,67	54,55	-5,89	54,67	62,06	-7,4
200	0,2785	67,33	58,72	8,62	77	66,63	10,37
250	0,2785	62	61,13	0,87	68	69,29	-1,29
300	0,2785	65	62,53	2,47	74	70,83	3,17
350	0,2785	56	63,34	-7,34	61	71,73	-10,73
400	0,2785	56	63,81	-7,81	65,75	72,25	-6,5
450	0,2785	53,75	64,08	-10,33	61,25	72,56	-11,31
50	0,3675	46,75	41,94	4,81	53,5	48,32	5,18
100	0,3675	59	58,54	0,46	68,33	66,49	1,84
150	0,3675	63	68,27	-5,27	74,5	77,2	-2,7
200	0,3675	77,5	73,96	3,54	89	83,52	5,48
250	0,3675	76,5	77,3	-0,8	89	87,25	1,75
300	0,3675	84,5	79,25	5,25	95	89,44	5,56
350	0,3675	84,75	80,4	4,35	92,5	90,74	1,76
400	0,3675	85,5	81,07	4,43	96,5	91,5	5
50	0,7433	85,5	71,98	13,52	97,25	81,3	15,95
100	0,7433	120,5	107,57	12,93	139	120,87	18,13
150	0,7433	127	129,26	-2,26	144,75	145,42	-0,67
200	0,7433	151,75	142,49	9,26	173,5	160,64	12,86
250	0,7433	149,25	150,55	-1,3	168,5	170,09	-1,59
300	0,7433	148	155,46	-7,46	167,33	175,95	-8,61
350	0,7433	158	158,46	-0,46	180,33	179,58	0,75
400	0,7433	159	160,29	-1,29	179,5	181,84	-2,34
450	0,7433	164,25	161,4	2,85	183	183,23	-0,23
100	0,972	137	138,72	-1,72	149	155,73	-6,73

Masa	Ley	Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
		Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas Leídas (medias)	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
150	0,972	166	168,63	-2,63	189	189,98	-0,98
200	0,972	179	187,26	-8,26	206	211,79	-5,79
250	0,972	192	198,86	-6,86	204	225,68	-21,68
300	0,972	207	206,09	0,91	240	234,53	5,47
350	0,972	192	210,59	-18,59	219	240,17	-21,17
400	0,972	204	213,4	-9,4	235	243,76	-8,76
450	0,972	220	215,14	4,86	253	246,04	6,96
500	0,972	225	216,23	8,77	262	247,5	14,5
550	0,972	222	216,91	5,09	257	248,42	8,58
600	0,972	232	217,33	14,67	259	249,01	9,99

Tabla 248. Datos de partida y valores predichos por el segundo modelo para los valores medios en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV

Aplicando ahora el método a los todos los datos, en vez de las medias, tenemos los siguientes resultados.

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		k2	mu	Q	P	F
0.5	10540,671	2,185	,539	10,829	40,710	13,300
1.4	10497,197	2,199	,539	10,829	40,710	13,300
2.4	10490,110	2,237	,544	10,228	40,544	13,323
3.5	10481,975	2,218	,537	9,633	40,844	13,346
4.1	10470,323	2,177	,600	12,042	45,772	13,600
5.2	10464,014	2,203	,600	11,494	45,484	13,600
6.1	10463,331	2,202	,537	10,190	40,749	13,600
7.1	10463,239	2,200	,540	10,332	40,996	13,600
8.1	10463,225	2,200	,533	10,199	40,494	13,600
9.1	10463,224	2,200	,533	10,181	40,446	13,600
10.1	10463,223	2,200	,532	10,174	40,422	13,600
11.1	10463,223	2,200	,532	10,174	40,420	13,600

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 11 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 249. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Historial de iteraciones.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
k2	2,200	,108	1,986	2,414
mu	,532	318146,80	-629195,945	629197,0
Q	10,174	6080690,3	-12025724,1	1E+007
P	40,420	24158357	-47777756,2	5E+007
F	13,600	1,639	10,358	16,842

Tabla 250. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Estimación de los parámetros.

	k2	mu	Q	P	F
k2	1,000	-,056	-,056	-,056	-,506
mu	-,056	1,000	1,000	1,000	-,081
Q	-,056	1,000	1,000	1,000	-,081
P	-,056	1,000	1,000	1,000	-,081
F	-,506	-,081	-,081	-,081	1,000

Tabla 251. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros.

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	1398369,8	5	279673,955
Residual	10463,223	135	77,505
Total sin corrección	1408833,0	140	
Total corregido	450174,250	139	

Variable dependiente: Cuentas_p

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,977.

Tabla 252. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6 MeV. ANOVA.

Y para el intervalo de energías entre 4,5 y 6,5 MeV:

Número de iteraciones[a]	Suma de cuadrados residual	Parámetro				
		k2	mu	Q	P	F
0.5	31771,323	2,185	,539	10,829	40,710	17,000
1.3	14311,787	2,460	,539	10,829	40,710	17,000
2.2	14288,145	2,498	,544	11,266	39,806	17,042
3.3	14247,707	2,463	,518	12,364	37,531	17,148
4.4	14247,576	2,460	,518	12,327	37,598	17,150
5.1	14227,695	2,472	,548	12,806	39,513	17,500
6.1	14225,625	2,460	,527	12,716	37,970	17,500
7.1	14225,473	2,462	,532	12,746	38,355	17,500
8.1	14225,471	2,462	,532	12,744	38,334	17,500
9.1	14225,471	2,462	,532	12,744	38,334	17,500
10.1	14225,471	2,462	,532	12,745	38,334	17,500

Las derivadas se calculan numéricamente.

a. El número de iteraciones mayores se muestra a la izquierda del decimal, mientras que el número de iteraciones menores se encuentra a la derecha del decimal.

b. La ejecución se detuvo después de 10 iteraciones. Se encontró la solución óptima.

Tabla 253. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Estimaciones de los parámetros.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
k2	2,462	,130	2,205	2,719
mu	,532	159133,01	-314715,594	314716,7
Q	12,745	3814672,5	-7544235,512	7544261
P	38,334	11473972	-22691948,4	2E+007
F	17,500	1,967	13,610	21,390

Tabla 254. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. Correlaciones de las estimaciones de los parámetros.

	k2	mu	Q	P	F
k2	1,000	-,242	-,242	-,242	-,538
mu	-,242	1,000	1,000	1,000	,240
Q	-,242	1,000	1,000	1,000	,240
P	-,242	1,000	1,000	1,000	,240
F	-,538	,240	,240	,240	1,000

Tabla 255. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA

ANOVA[a]

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	1804143,5	5	360828,706
Residual	14225,471	135	105,374
Total sin corrección	1818369,0	140	
Total corregido	574363,221	139	

Variable dependiente: Cuentas_g

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma corregida de cuadrados) = ,975.

Tabla 256. Resultados de la regresión no lineal restringida según el segundo modelo, para todos los valores y en el intervalo de energía de 4,5 – 6,5 MeV. ANOVA

La tabla de la diferencia entre las cuentas leídas y las cuentas calculadas según el modelo es la siguiente:

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
50	0,042	16	16,99	-0,99	18	21,24	-3,24
50	0,042	11	16,99	-5,99	16	21,24	-5,24
50	0,042	15	16,99	-1,99	21	21,24	-0,24
100	0,042	18	18,76	-0,76	19	23,13	-4,13
100	0,042	19	18,76	0,24	23	23,13	-0,13
100	0,042	16	18,76	-2,76	22	23,13	-1,13
150	0,042	20	19,69	0,31	29	24,09	4,91
150	0,042	18	19,69	-1,69	22	24,09	-2,09
150	0,042	17	19,69	-2,69	20	24,09	-4,09
200	0,042	23	20,17	2,83	25	24,57	0,43
200	0,042	22	20,17	1,83	25	24,57	0,43
200	0,042	20	20,17	-0,17	23	24,57	-1,57
250	0,042	21	20,42	0,58	23	24,81	-1,81
250	0,042	23	20,42	2,58	28	24,81	3,19
250	0,042	28	20,42	7,58	34	24,81	9,19
250	0,042	26	20,42	5,58	26	24,81	1,19
300	0,042	17	20,55	-3,55	20	24,93	-4,93
300	0,042	20	20,55	-0,55	22	24,93	-2,93
300	0,042	23	20,55	2,45	26	24,93	1,07
300	0,042	24	20,55	3,45	27	24,93	2,07
350	0,042	22	20,62	1,38	27	25	2
350	0,042	26	20,62	5,38	25	25	0
350	0,042	24	20,62	3,38	34	25	9
350	0,042	22	20,62	1,38	25	25	0
400	0,042	17	20,65	-3,65	21	25,03	-4,03
400	0,042	23	20,65	2,35	26	25,03	0,97
400	0,042	30	20,65	9,35	39	25,03	13,97
400	0,042	29	20,65	8,35	32	25,03	6,97
450	0,042	19	20,67	-1,67	25	25,04	-0,04
450	0,042	22	20,67	1,33	23	25,04	-2,04
450	0,042	17	20,67	-3,67	20	25,04	-5,04
450	0,042	21	20,67	0,33	24	25,04	-1,04
50	0,2785	40	36,48	3,52	46	42,88	3,12
50	0,2785	38	36,48	1,52	47	42,88	4,12
50	0,2785	36	36,48	-0,48	47	42,88	4,12
50	0,2785	29	36,48	-7,48	34	42,88	-8,88
100	0,2785	59	48,84	10,16	70	56,34	13,66

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
100	0,2785	39	48,84	-9,84	46	56,34	-10,34
100	0,2785	42	48,84	-6,84	47	56,34	-9,34
150	0,2785	46	55,52	-9,52	49	63,47	-14,47
150	0,2785	58	55,52	2,48	67	63,47	3,53
150	0,2785	42	55,52	-13,52	48	63,47	-15,47
200	0,2785	79	59,13	19,87	88	67,25	20,75
200	0,2785	64	59,13	4,87	77	67,25	9,75
200	0,2785	59	59,13	-0,13	66	67,25	-1,25
250	0,2785	61	61,08	-0,08	67	69,25	-2,25
250	0,2785	63	61,08	1,92	67	69,25	-2,25
250	0,2785	62	61,08	0,92	70	69,25	0,75
300	0,2785	73	62,14	10,86	80	70,32	9,68
300	0,2785	63	62,14	0,86	72	70,32	1,68
300	0,2785	57	62,14	-5,14	66	70,32	-4,32
300	0,2785	67	62,14	4,86	78	70,32	7,68
350	0,2785	49	62,71	-13,71	56	70,88	-14,88
350	0,2785	51	62,71	-11,71	57	70,88	-13,88
350	0,2785	59	62,71	-3,71	62	70,88	-8,88
350	0,2785	65	62,71	2,29	69	70,88	-1,88
400	0,2785	52	63,02	-11,02	65	71,18	-6,18
400	0,2785	63	63,02	-0,02	70	71,18	-1,18
400	0,2785	50	63,02	-13,02	59	71,18	-12,18
400	0,2785	59	63,02	-4,02	69	71,18	-2,18
450	0,2785	45	63,18	-18,18	54	71,34	-17,34
450	0,2785	56	63,18	-7,18	59	71,34	-12,34
450	0,2785	61	63,18	-2,18	69	71,34	-2,34
450	0,2785	53	63,18	-10,18	63	71,34	-8,34
50	0,3675	48	43,96	4,04	55	51,24	3,76
50	0,3675	50	43,96	6,04	58	51,24	6,76
50	0,3675	48	43,96	4,04	50	51,24	-1,24
50	0,3675	41	43,96	-2,96	51	51,24	-0,24
100	0,3675	55	60,57	-5,57	64	69,43	-5,43
100	0,3675	56	60,57	-4,57	63	69,43	-6,43
100	0,3675	66	60,57	5,43	78	69,43	8,57
150	0,3675	72	69,67	2,33	84	79,24	4,76
150	0,3675	62	69,67	-7,67	76	79,24	-3,24
150	0,3675	63	69,67	-6,67	73	79,24	-6,24

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
150	0,3675	55	69,67	-14,67	65	79,24	-14,24
200	0,3675	74	74,64	-0,64	90	84,52	5,48
200	0,3675	78	74,64	3,36	90	84,52	5,48
200	0,3675	80	74,64	5,36	91	84,52	6,48
200	0,3675	78	74,64	3,36	85	84,52	0,48
250	0,3675	72	77,37	-5,37	83	87,37	-4,37
250	0,3675	66	77,37	-11,37	79	87,37	-8,37
250	0,3675	91	77,37	13,63	103	87,37	15,63
250	0,3675	77	77,37	-0,37	91	87,37	3,63
300	0,3675	78	78,86	-0,86	87	88,91	-1,91
300	0,3675	100	78,86	21,14	112	88,91	23,09
300	0,3675	74	78,86	-4,86	81	88,91	-7,91
300	0,3675	86	78,86	7,14	100	88,91	11,09
350	0,3675	78	79,68	-1,68	82	89,74	-7,74
350	0,3675	87	79,68	7,32	98	89,74	8,26
350	0,3675	89	79,68	9,32	95	89,74	5,26
350	0,3675	85	79,68	5,32	95	89,74	5,26
400	0,3675	78	80,12	-2,12	92	90,18	1,82
400	0,3675	81	80,12	0,88	94	90,18	3,82
400	0,3675	89	80,12	8,88	95	90,18	4,82
400	0,3675	94	80,12	13,88	105	90,18	14,82
50	0,7433	74	76,35	-2,35	82	87,68	-5,68
50	0,7433	94	76,35	17,65	108	87,68	20,32
50	0,7433	83	76,35	6,65	94	87,68	6,32
50	0,7433	91	76,35	14,65	105	87,68	17,32
100	0,7433	119	112,38	6,62	142	127,93	14,07
100	0,7433	119	112,38	6,62	133	127,93	5,07
100	0,7433	114	112,38	1,62	136	127,93	8,07
100	0,7433	130	112,38	17,62	145	127,93	17,07
150	0,7433	116	133,07	-17,07	132	151,01	-19,01
150	0,7433	146	133,07	12,93	171	151,01	19,99
150	0,7433	116	133,07	-17,07	130	151,01	-21,01
150	0,7433	130	133,07	-3,07	146	151,01	-5,01
200	0,7433	163	144,96	18,04	183	164,25	18,75
200	0,7433	150	144,96	5,04	172	164,25	7,75
200	0,7433	143	144,96	-1,96	170	164,25	5,75
200	0,7433	151	144,96	6,04	169	164,25	4,75

		Intervalo de energía 4,5 – 6 MeV			Intervalo energía 4,5 – 6,5 MeV		
Masa	Ley	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción	Cuentas Leídas	Predicción con los coeficientes de la regresión	Diferencia entre real -predicción
250	0,7433	157	151,78	5,22	172	171,84	0,16
250	0,7433	137	151,78	-14,78	156	171,84	-15,84
250	0,7433	170	151,78	18,22	199	171,84	27,16
250	0,7433	133	151,78	-18,78	147	171,84	-24,84
300	0,7433	145	155,7	-10,7	165	176,2	-11,2
300	0,7433	148	155,7	-7,7	166	176,2	-10,2
300	0,7433	152	155,7	-3,7	171	176,2	-5,2
350	0,7433	158	157,95	0,05	181	178,69	2,31
350	0,7433	160	157,95	2,05	181	178,69	2,31
350	0,7433	157	157,95	-0,95	179	178,69	0,31
400	0,7433	185	159,24	25,76	207	180,12	26,88
400	0,7433	141	159,24	-18,24	159	180,12	-21,12
400	0,7433	150	159,24	-9,24	172	180,12	-8,12
400	0,7433	160	159,24	0,76	180	180,12	-0,12
450	0,7433	156	159,98	-3,98	177	180,94	-3,94
450	0,7433	160	159,98	0,02	185	180,94	4,06
450	0,7433	170	159,98	10,02	182	180,94	1,06
450	0,7433	171	159,98	11,02	188	180,94	7,06
100	0,972	137	145,53	-8,53	149	165,76	-16,76
150	0,972	166	174,35	-8,35	189	198,41	-9,41
200	0,972	179	191,33	-12,33	206	217,74	-11,74
250	0,972	192	201,33	-9,33	204	229,18	-25,18
300	0,972	207	207,22	-0,22	240	235,96	4,04
350	0,972	192	210,7	-18,7	219	239,97	-20,97
400	0,972	204	212,74	-8,74	235	242,35	-7,35
450	0,972	220	213,95	6,05	253	243,75	9,25
500	0,972	225	214,66	10,34	262	244,59	17,41
550	0,972	222	215,08	6,92	257	245,08	11,92
600	0,972	232	215,32	16,68	259	245,37	13,63

Tabla 257. Datos de partida y valores predichos por el segundo modelo para todos los valores en los intervalos de energía de 4,5 - 6 MeV y de 4,5 – 6,5 MeV

7.4.3. Tercer modelo.

Se realizan las siguientes consideraciones o hipótesis para este tercer modelo:

- se considera la misma geometría unidimensional como en los casos anteriores, pero en este caso responde a la Figura 474
- se supone que la activación de un elemento diferencial de muestra depende de la distancia ($x+a$) en la dirección x a la fuente y que
- la relación de dependencia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del elemento diferencial al centro de la fuente,
- que los rayos gamma se atenúan con la distancia al detector según una ley exponencial de coeficiente negativo del tipo $y = ae^{-bx}$.

El número de cuentas "C" en un intervalo de energía determinado que llegan al detector por el efecto de la activación neutrónica tendría una expresión como la siguiente:

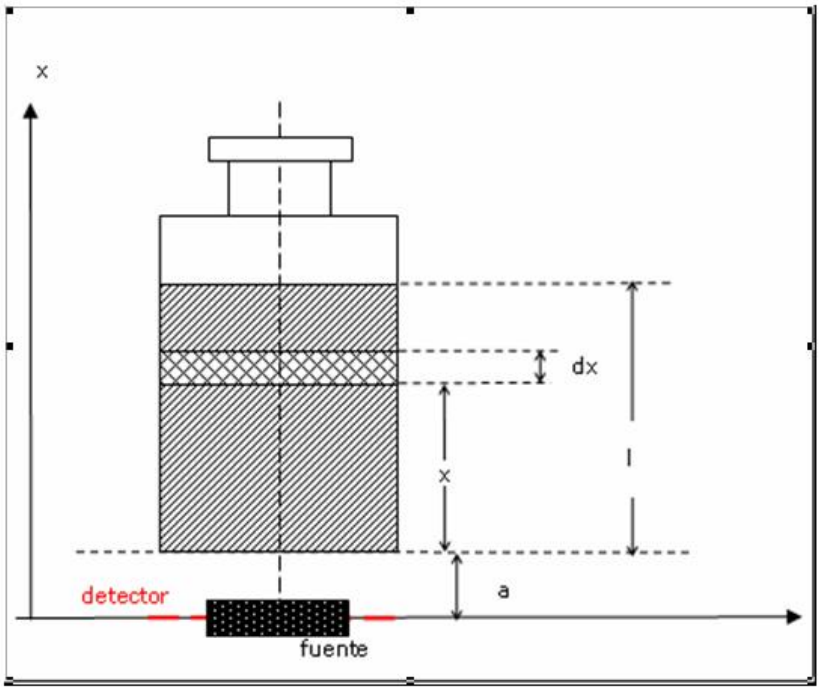


Figura 474. Consideraciones geométricas para el tercer modelo.

$$C_3 = K \cdot y \cdot \int_a^{l+a} \frac{e^{-\zeta \cdot x} dx}{(a+x)^2} \qquad [16]$$

Para un valor dado de la ley, los dos primeros términos *K* e *y* son constantes. Esta integral se puede resolver por partes, donde,

$$\int_0^l \frac{e^{-\zeta x}}{(a+x)^2}dx = \frac{-e^{-\zeta x}}{a+x} - \int_0^l \frac{e^{-\zeta x}}{a+x}dx$$

La integral del segundo término se resuelve también por partes,

$$\int_0^l \frac{e^{-\zeta x}}{a+x}dx = e^{-\zeta x}\ln(a+x) - \int_0^l \ln(a+x)e^{-\zeta x}$$

en donde,

$$\int \ln(a+x)e^{-\zeta x} = \frac{-\ln(x)e^{-\zeta x} + Ei(1,\zeta\cdot x)}{\zeta}$$

que entre los límites de la integral se convierte en:

$$\int_0^l \ln(a+x)e^{-\zeta x} = \frac{-\ln(x)e^{-\zeta x} + Ei(1,\zeta\cdot x)}{\zeta}\Bigg]_0^l$$

La resolución matemática de este tercer modelo es diferente a las realizadas anteriormente. En este caso no existe una fórmula matemática analítica que resuelva la integral debiendo realizarse su solución mediante cálculo numérico, que implicaría adoptar unas funciones que se ajustasen a los valores numéricos obtenidos.

Esta solución se podría elaborar a partir de una solución polinómica de las funciones solución de los modelos 1 y 2.

Una forma más práctica de analizar el tercer modelo consiste en utilizar como ecuación para el modelo de regresión un polinomio de primer orden de las soluciones del primer y segundo modelo.

$$\text{Solución tercer modelo} = \alpha * \text{solución modelo 1} + \beta * \text{solución modelo 2}$$

Siendo α y β coeficientes que cumplen la doble condición de ser positivos cuya suma sea igual a 1:

$$\alpha + \beta = 1$$

Se ha realizado este proceso con el programa SPSS, y los resultados obtenidos, como en los demás casos, dependen fuertemente de los valores iniciales y de las restricciones impuestas a los distintos parámetros. A medida que se ciñen más los valores de los parámetros a los valores reales de los mismos, α alcanza el valor 1,000, mientras que β vale 0,000.

7.4.4. Conclusiones.

En la Tabla 258 se muestran un resumen de los valores de los parámetros de los modelos 1 y 2.

PRIMER MODELO					SEGUNDO MODELO				
$C_1 = \frac{k_1 \cdot m \cdot (Q_1 \cdot y^2 + P_1 \cdot y)}{a \cdot (m + Q_1 \cdot a \cdot y + P_1 \cdot a)} + F_1$					$C_2 = (k_2 \cdot Q_2 \cdot y^2 + k_2 \cdot P_2 \cdot y)\frac{1}{\mu} \cdot \left(1 - e^{-\mu \cdot \frac{m}{Q_2 \cdot y + P_2}}\right) + F_2$				
Parámetros	Valores medios		Todos los valores		Parámetros	Valores medios		Todos los valores	
	4,5 – 6 MeV	4,5 – 6,5 MeV	4,5 – 6 MeV	4,5 – 6,5 MeV		4,5 – 6 MeV	4,5 – 6,5 MeV	4,5 – 6 MeV	4,5 – 6,5 MeV
k_1	9,798	11,002	7,819	8,748	k_2	1,992	2,159	2,2	2,462
a	1,832	1,874	1,558	1,551	μ	0,505	0,48	0,532	0,532
Q_1	7,515	10,182	8,773	18,821	Q_2	10,127	12,827	10,174	12,745
P_1	38,978	38,363	40,089	38,337	P_2	43,486	40,684	40,420	38,334
F_1	13,598	17,385	13,349	16,776	F_2	13,6	17,5	13,6	17,5
R^2	0,994	0,992	0,978	0,977	R^2	0,991	0,989	0,997	0,975

Tabla 258. Resumen de los parámetros de los modelos 1 y 2.

Directamente de la tabla se desprende que el intervalo de energías comprendido entre 4,5 – 6 MeV presenta siempre mejores correlaciones, y por eso, es el elegido para hacer el análisis.

En la Figura 475 y Figura 476 se representan las ecuaciones matemáticas del modelo 1 y del modelo 2 con los parámetros correspondientes al intervalo de energía comprendido entre 4,5 y 6 MeV. La forma de la superficie final es muy parecida.

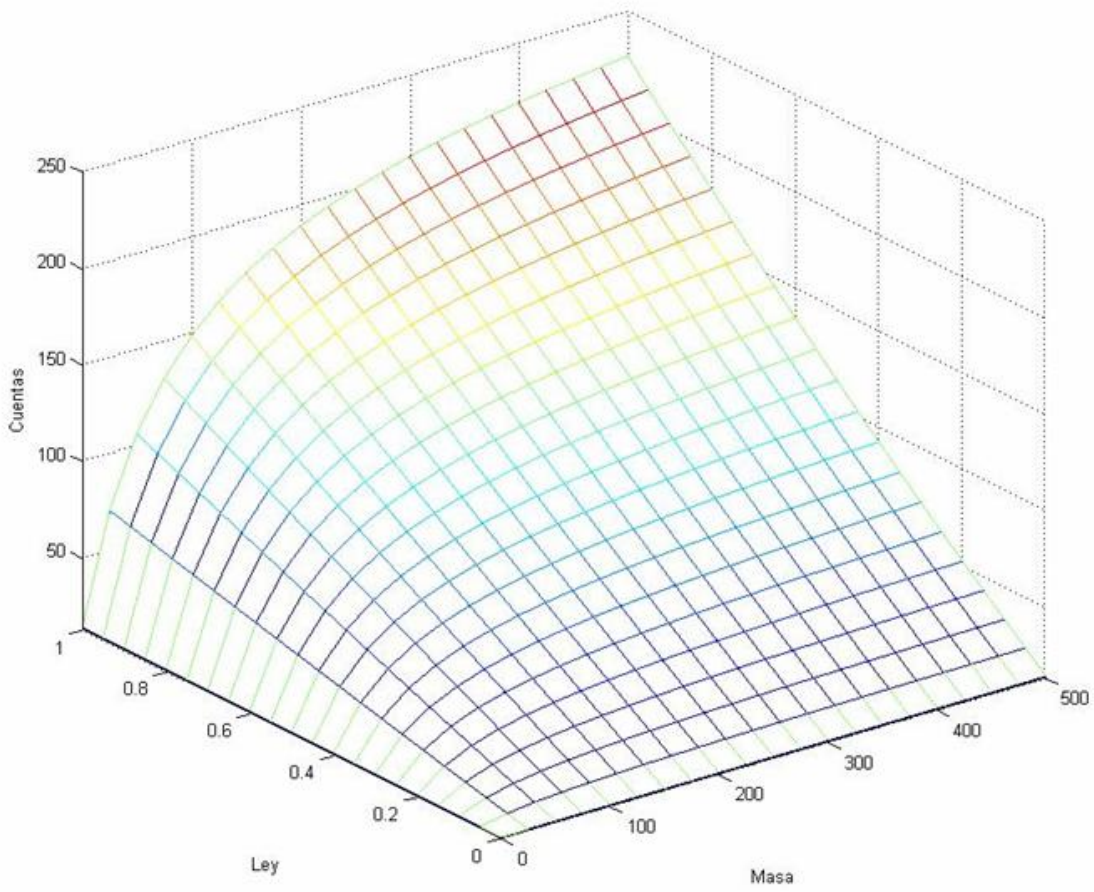


Figura 475. Representación tridimensional de la superficie matemática correspondiente al modelo 1 con los parámetros del intervalo de energía comprendido entre 4,5 y 6 MeV.

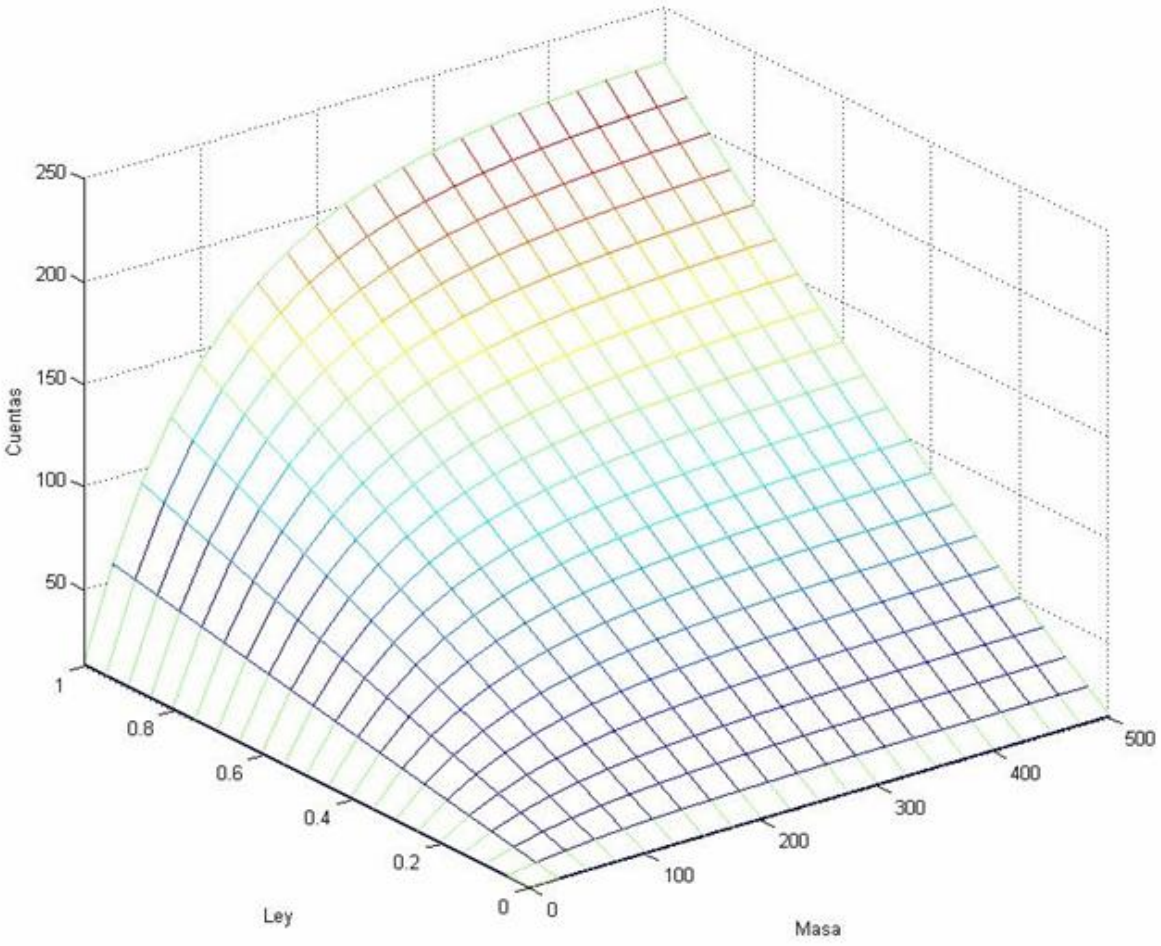


Figura 476. Representación tridimensional de la superficie matemática correspondiente al modelo 2 con los parámetros del intervalo de energía comprendido entre 4,5 y 6 MeV.

[1] Modelo 2.

El coeficiente de atenuación lineal de la muestra varía con la composición de la misma. La muestra contiene F, Ca, C, Ba, etc, en proporción variable según la ley y la procedencia de la misma.

Consultada la bibliografía respecto a los posibles valores de coeficientes de atenuación lineal de elementos que pueden estar en la muestra, se han encontrado datos que sirven de comparación, y que se exponen en la siguiente tabla.

Elemento	Energía		
	4 MeV	5 MeV	6 MeV
Oxígeno	0.0310	0.0278	0.0254
Carbono	0.0305	0.0271	0.0246
Calcio	0.0340	0.0318	0.0301
Fluoruro de litio	0.0286	0.0256	0.0233

Tabla 259. Valores de $\frac{\mu}{\rho}$ (donde ρ es la densidad) para distintos elementos. [112]

Según esta tabla, es de esperar que en la muestra el valor de $\frac{\mu}{\rho}$ sea del orden de 0,03. La densidad aparente de la muestra de fluorita

es del orden de 1,5 g/cm^3, por lo que se estima que μ tomaría un valor de 0,045 aproximadamente. Este valor esperado de μ es de 0,045 es 10 veces más pequeño que el obtenido en el modelo.

La fórmula matemática del modelo 2, para ajustarse a los valores experimentales con un coeficiente de correlación elevado, necesita dar al parámetro μ un valor más de 10 veces superior al valor de la bibliografía, según se ve en las Tabla 237, Tabla 241, Tabla 245, Tabla 250 y Tabla 254 que oscila entre 0,480 y 0,532.

La conclusión que extrae de esta discrepancia es:

"que el peso del fenómeno de atenuación de los rayos gamma en la muestra, es considerablemente menor que el peso del fenómeno de merma de rayos gamma debido a la reducción de la activación provocada por la caída del flujo de neutrones".

En la Figura 477 se representan simbólicamente los tres modelos.

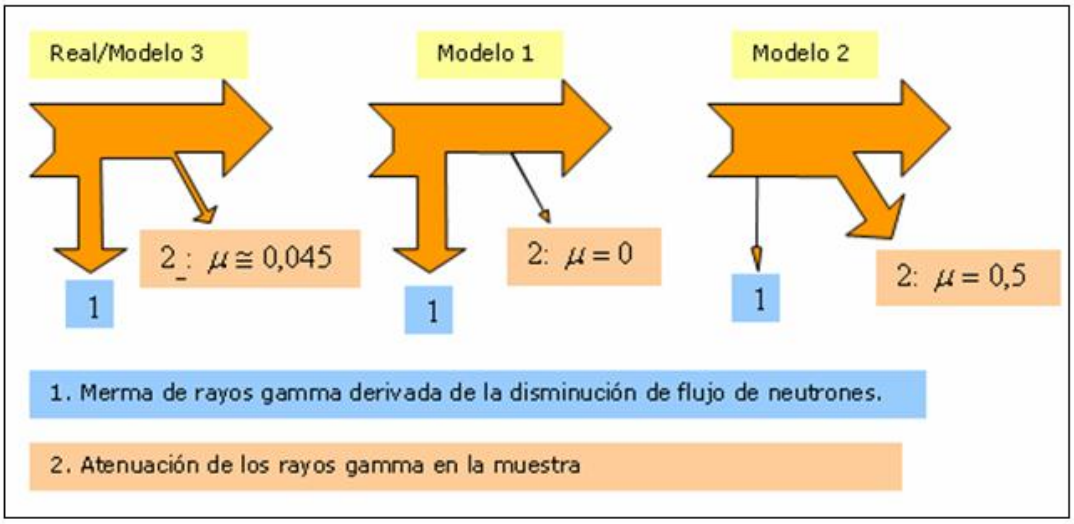


Figura 477. Representación simbólica de los modelos.

[2] Modelo 3.

Estableciendo las restricciones en torno al valor esperado para el parámetro μ en el procesado en el programa SPSS en el tercer modelo, se obtiene que la participación del fenómeno de atenuación de los rayos gamma (expresado por el parámetro β) es despreciable.

En consecuencia, del análisis del modelo 3 se obtiene la misma conclusión que se ha expresado anteriormente en el modelo 2, es decir, el efecto de la atenuación de los rayos gamma es despreciable respecto a la merma de rayos gamma derivada de la disminución de flujo de neutrones.

[3] Modelo 1.

El modelo 1 se obtiene con un coeficiente de correlación muy elevado y los valores de los parámetros a, k_1, P, Q y F son coherentes con la realidad.

"Esto unido a las conclusiones anteriores, lleva a concluir que este es un modelo adecuado".

A continuación se hace una comparación entre los valores de la ley obtenidos por análisis químico y los valores de la ley predichos por el modelo 1. Para ello se utilizan tres conjuntos de muestras distintas:

- El conjunto de muestras cuyos resultados se utilizaron para hacer el modelo,
- El primer conjunto de muestras, que no fueron utilizadas para establecer el modelo y que tienen la particularidad de que tienen unas masas próximas a 300 g.
- El segundo conjunto de muestras, que tienen masas dispares entre sí, y que tienen leyes distintas a las usadas para hacer el modelo.

Se han utilizado los parámetros extraídos según el modelo 1, para la media de los valores en el intervalo de energías entre 4,5 y 6 MeV.

Se comienza por expresar la ley en función de las cuentas. A partir de la ecuación del modelo 1,

$$C = \left(\frac{k \cdot m \cdot \left(Q \cdot y^2 + P \cdot y \right)}{a \cdot \left(m + Q \cdot a \cdot y + P \cdot a \right)} \right) + F$$

Se obtiene que,

$$y = \frac{\left[(C-F) \cdot Q \cdot a^2 - k \cdot m \cdot P \right] \pm \sqrt{\left[k \cdot m \cdot P - (C-F) \cdot Q \cdot a^2 \right]^2 + 4 \cdot \left[k \cdot m \cdot Q \right] \cdot \left[(C-F) \cdot \left(P \cdot a^2 + m \cdot a \right) \right]}}{2 \cdot \left[k \cdot m \cdot Q \right]} \qquad \textbf{[17]}$$

La representación en tres dimensiones de esta ecuación se puede ver en la Figura 478.

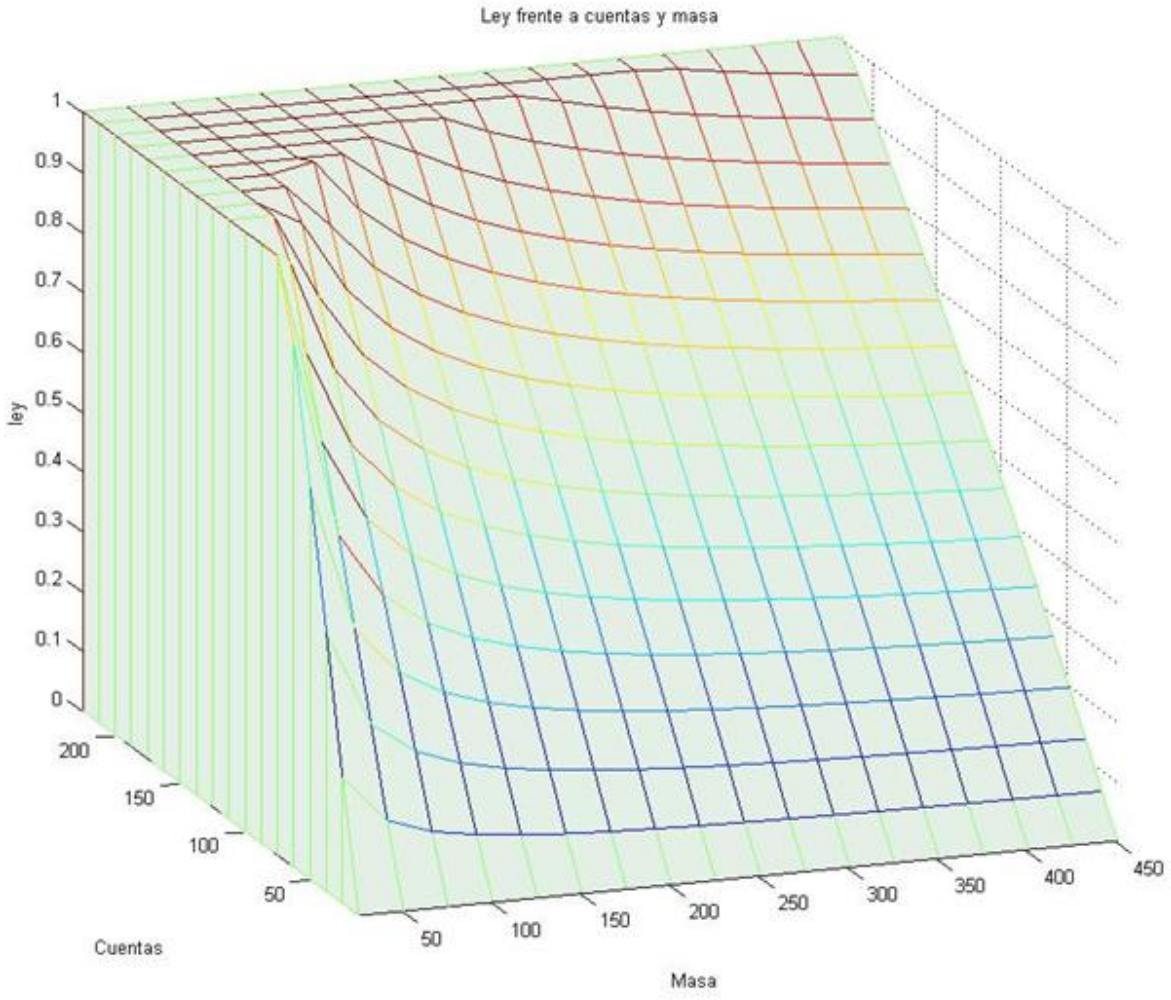


Figura 478. Representación tridimensional de la ley, según el primer modelo, para el intervalo de energía entre 4,5 y 6 MeV.

En la Figura 479 y Figura 480 se muestran las proyecciones de esta superficie sobre los distintos planos.

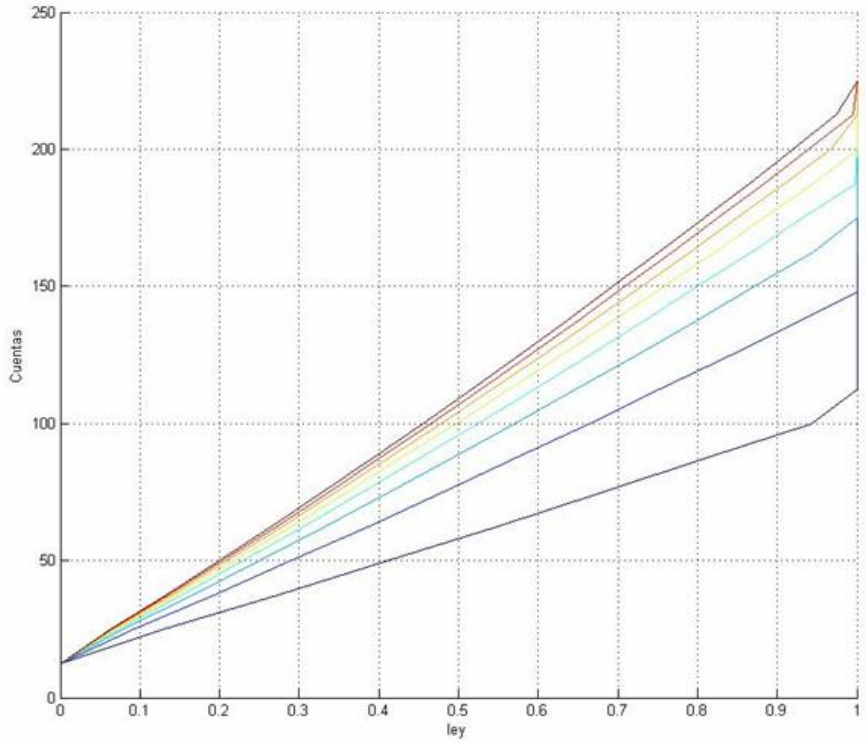


Figura 479. Representación de la ley - cuentas según el modelo 1.

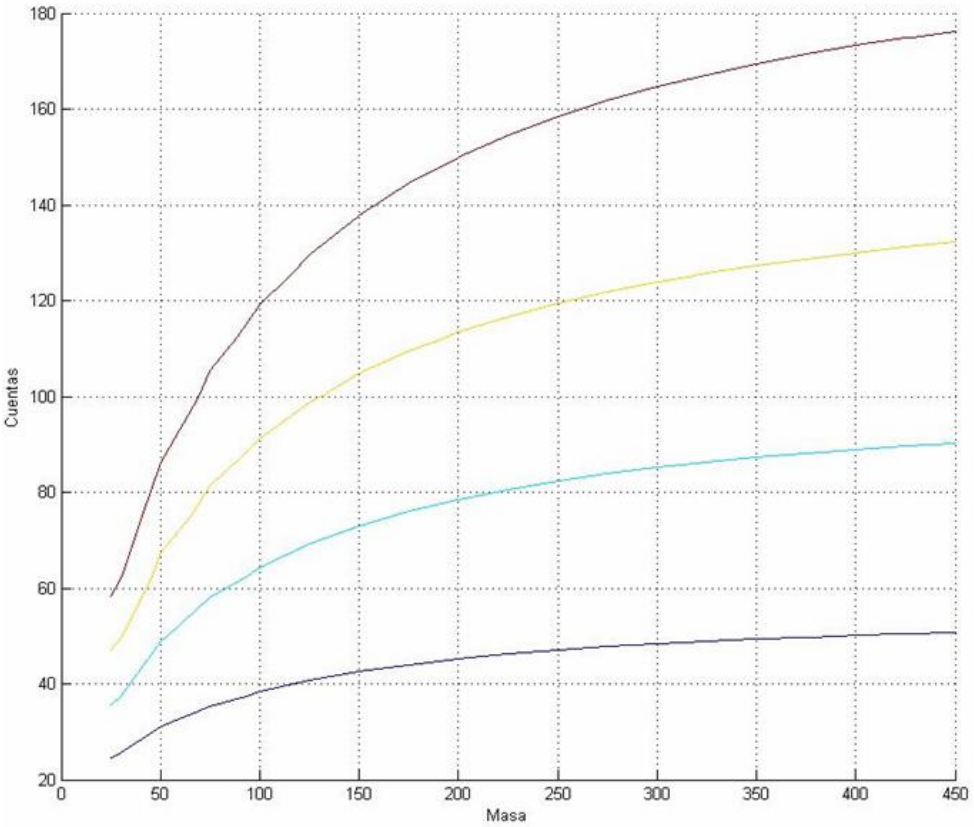


Figura 480. Representación cuentas – masa para distintas leyes, según el modelo 1.

En la Figura 481 se expresa de forma gráfica una comparación entre los resultados del análisis químico y los resultados de la aplicación del modelo 1 a las muestras que se utilizaron para hacer el modelo.

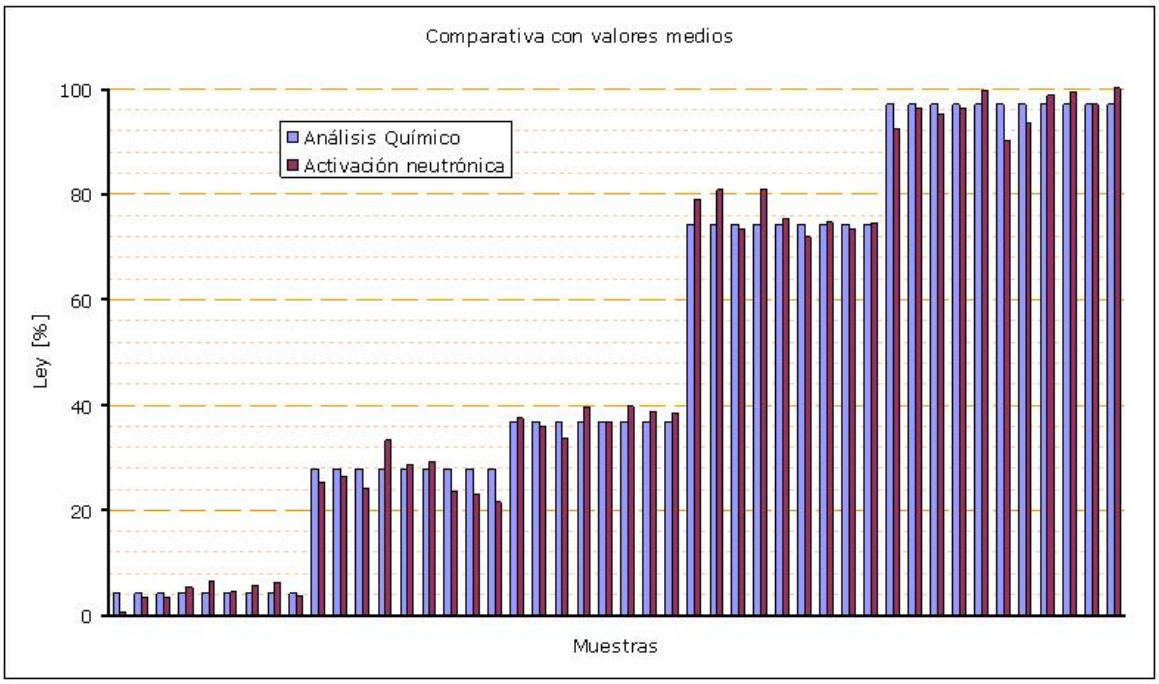


Figura 481. Comparativa entre el análisis químico y la activación neutrónica, de las muestras usadas en la deducción del modelo.

De manera tabulada, se muestran estos resultados a continuación:

Masa (g)	Ley según análisis químico	Cuentas intervalo 4,5 – 6 MeV	Ley activación modelo 1	Diferencia resultados (sobre la ley en %)
50	0,042	14	0,0047	3,7
100	0,042	17,67	0,0334	0,9
150	0,042	18,33	0,0334	0,9
200	0,042	21,67	0,0522	-1,0
250	0,042	24,5	0,0666	-2,5
300	0,042	21	0,0437	-0,2
350	0,042	23,5	0,0567	-1,5
400	0,042	24,75	0,0624	-2,0
450	0,042	19,75	0,0340	0,8
50	0,2785	35,75	0,2531	2,5
100	0,2785	46,67	0,2642	1,4
150	0,2785	48,67	0,2409	3,8
200	0,2785	67,33	0,3342	-5,6
250	0,2785	62	0,2864	-0,8
300	0,2785	65	0,2921	-1,4
350	0,2785	56	0,2360	4,2
400	0,2785	56	0,2310	4,7
450	0,2785	53,75	0,2155	6,3
50	0,3675	46,75	0,3754	-0,8
100	0,3675	59	0,3592	0,8
150	0,3675	63	0,3354	3,2
200	0,3675	77,5	0,3943	-2,7
250	0,3675	76,5	0,3679	0,0
300	0,3675	84,5	0,3969	-2,9
350	0,3675	84,75	0,3872	-2,0
400	0,3675	85,5	0,3828	-1,5
50	0,7433	85,5	0,7918	-4,9
100	0,7433	120,5	0,8097	-6,6
150	0,7433	127	0,7354	0,8
200	0,7433	151,75	0,8098	-6,7
250	0,7433	149,25	0,7540	-1,1
300	0,7433	148	0,7196	2,4
350	0,7433	158	0,7468	-0,4
400	0,7433	159	0,7354	0,8
450	0,7433	164,25	0,7464	-0,3
100	0,972	137	0,9251	4,7
150	0,972	166	0,9645	0,8
200	0,972	179	0,9535	1,8
250	0,972	192	0,9659	0,6
300	0,972	207	0,9988	-2,7
350	0,972	192	0,9034	6,9
400	0,972	204	0,9367	3,5
450	0,972	220	0,9887	-1,7
500	0,972	225	0,9956	-2,4
550	0,972	222	0,9718	0,0
600	0,972	232	1,0026	-3,1

Tabla 260. Comparativa entre análisis químico y activación neutrónica para las muestras utilizadas en la elaboración del modelo.

Los resultados de la aplicación de la activación neutrónica para el primer conjunto de muestras, no utilizadas en la elaboración del modelo 1, son:

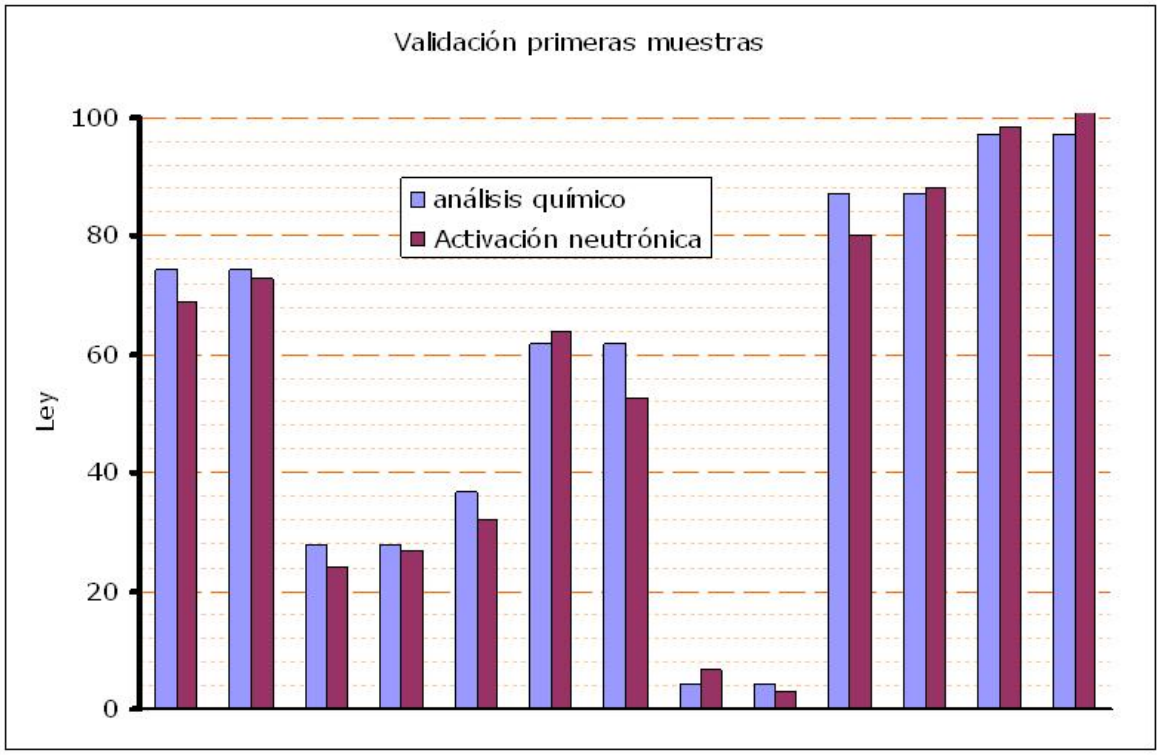


Figura 482. Comparativa entre el análisis químico y la activación neutrónica, de muestras no usadas en la deducción del modelo.

Estos resultados se muestran en forma de tabla a continuación:

Masa	Ley según análisis químico	Cuentas intervalo 4,5 – 6 MeV	Ley activación modelo 1	Diferencia resultados (sobre la ley en %)
293,922	0,74330	141	0,6880	5,5
312,026	0,74330	151	0,7288	1,5
311,397	0,27850	56	0,2410	3,7
303,347	0,27850	61	0,2697	0,9
295,545	0,36750	70	0,3202	4,7
294,415	0,61830	131	0,6381	-2,0
298,885	0,61830	109	0,5249	9,3
300,247	0,04200	25	0,0670	-2,5
303,953	0,04200	19	0,0318	1,0
313,28	0,87020	166	0,8000	7,0
305,995	0,87020	182	0,8792	-0,9
317,179	0,97200	206	0,9836	-1,2
300,092	0,97200	254	1,2095	-23,8

Tabla 261. Diferencia entre los valores predichos según el modelo 1 para las primeras muestras no usadas en la deducción del modelo.

Finalmente, para el último conjunto de muestras, de leyes y masas dispares entre sí, y dispares con la consideradas en la elaboración del modelo, se obtienen las siguientes gráficas y tablas.

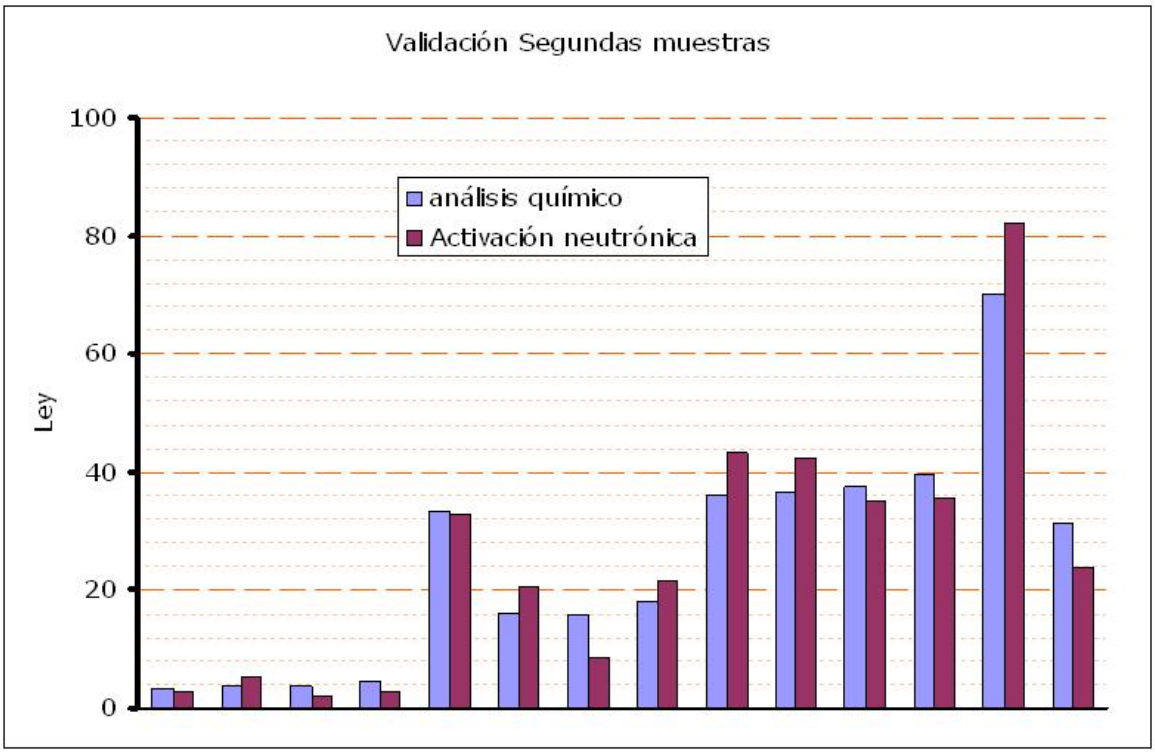


Figura 483. Comparativa entre el análisis químico y la activación neutrónica, de muestras no usadas en la deducción del modelo y de leyes y masas dispares.

Masa	Ley según análisis químico	Cuentas intervalo 4,5 – 6 MeV	Ley activación modelo 1	Diferencia resultados (sobre la ley en %)
257,1	0,0348	18	0,0269	0,8
269,9	0,0353	22	0,0506	-1,5
254,6	0,0353	17	0,0208	1,4
227,1	0,0454	18	0,0276	1,8
205,7	0,332	67	0,3298	0,2
223,9	0,1612	47	0,2052	-4,4
166,7	0,1593	26	0,0840	7,5
232,9	0,1793	49	0,2151	-3,6
190,4	0,3607	83	0,4322	-7,1
139,8	0,3659	75	0,4228	-5,7
230,6	0,3764	72	0,3492	2,7
177,3	0,3974	69	0,3557	4,2
300,85	0,7011	169	0,8206	-11,9
337,2	0,313	56	0,2376	7,5

Tabla 262. Diferencia entre los valores predichos según el modelo 1 para las segundas muestras de leyes y masas dispares.

8. Mejoras del proceso de activación neutrónica para la fluorita.

En este capítulo se exponen las mejoras que, a la vista de los resultados anteriores, se han planteado con objeto de incrementar la lectura procedente de las muestras activadas.

Se ha visto que el procedimiento actual adolece que el número de cuentas para una ley determinada es pequeño. Es decir, si con una muestra de 60% de ley el número de cuentas es de 120, una cuenta representa 0,5 puntos de ley.

En conclusión, es necesario que el procedimiento ensayado sea mejorado para conseguir una mayor resolución, o capacidad de distinguir entre leyes similares.

Si consiguiésemos multiplicar por *n* el número de cuentas leído, habremos aumentado la resolución del proceso en esa misma magnitud. En este capítulo se establecen algunos procedimientos de mejora de la resolución en base de los resultados obtenidos y del estudio del origen de la señal.

8.1. Posibilidades de mejora de la señal en función del modelo.

Una vez validado el primer modelo, se pueden analizar las consecuencias de aumentar la masa de la muestra o de modificar su geometría, (variando la superficie S del contenedor de la muestra) o aumentando la densidad aparente de la muestra (compactación de la muestra). En la Figura 484 se muestra el resultado de la simulación de diferentes situaciones a partir de la ecuación del modelo 1.

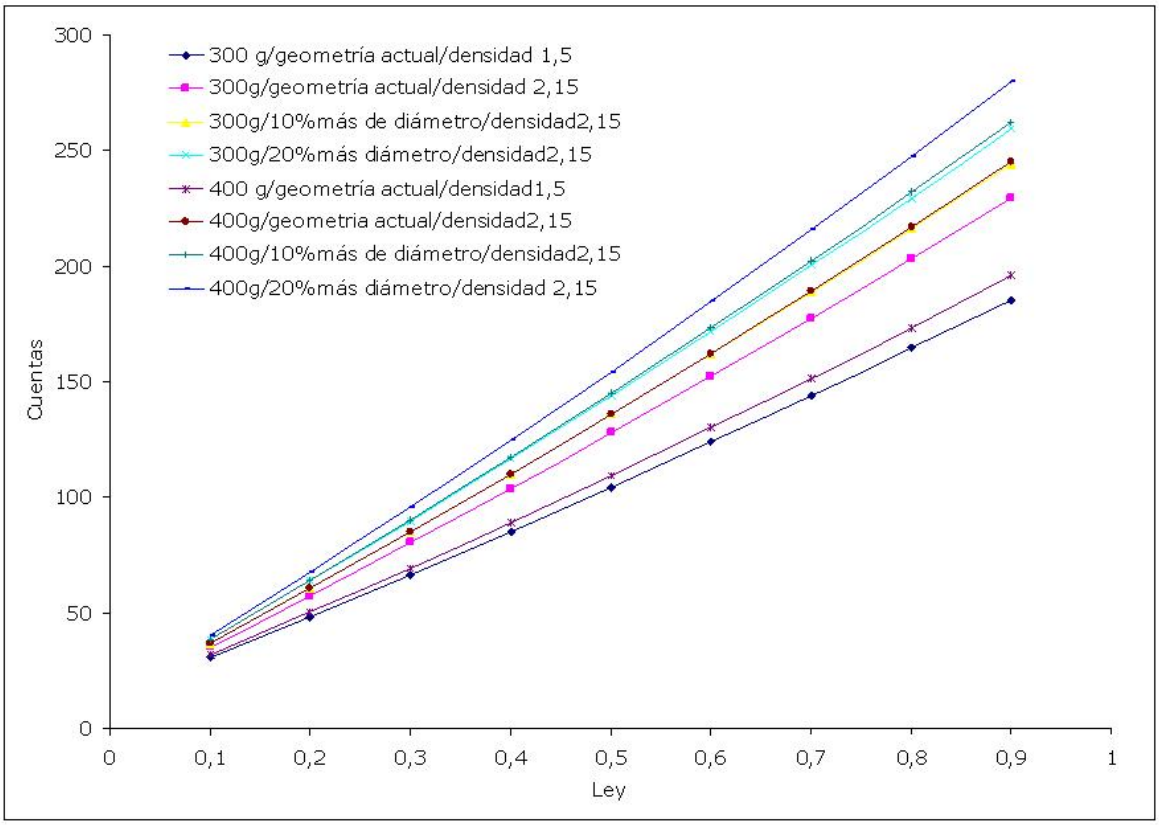


Figura 484. Influencia de la respuesta a la activación de muestras de fluorita al modificar distintos parámetros.

Como se aprecia, la mayor ganancia de cuentas se obtiene aumentando la densidad de la muestra, mediante un proceso de compactación de la misma. Esta es la vía más razonable, según se deduce del modelo.

La densidad de la fluorita es aproximadamente 2,8 g/cm^3, y por tanto, todavía queda mucho margen para aumentar el número de cuentas.

8.2. Aumento del flujo de neutrones en la muestra.

El proceso total de activación neutrónica, se puede descomponer en una cadena de transformaciones que están influidas por el de rendimiento, tal como se observa en la Figura 485.

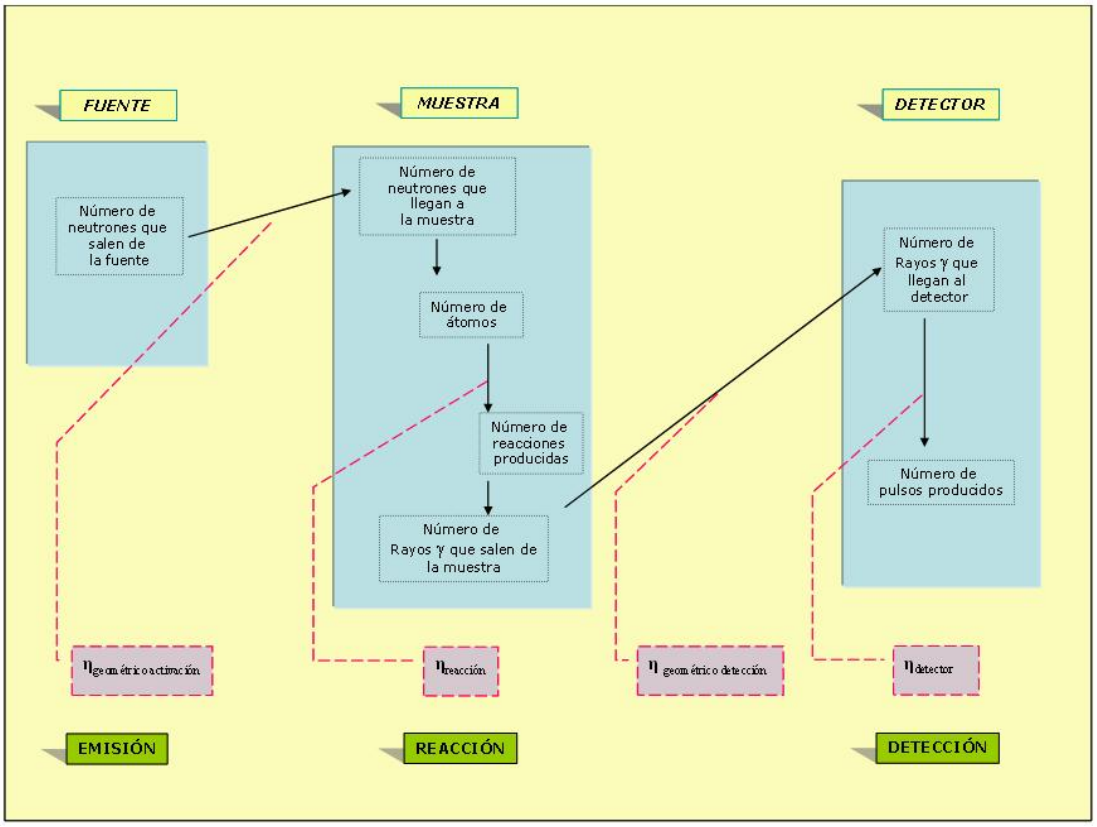


Figura 485. Procesos que tienen lugar en la realización práctica de la activación neutrónica.

El proceso comienza con la emisión de neutrones por parte de la fuente de neutrones.

La fuente de neutrones emite neutrones de forma isótropa en todas las direcciones del espacio.

Una fuente de 1 Ci de actividad como la utilizada en los ensayos, produce 3,7 10^{10} neutrones por segundo que parten de la fuente considerada puntual y se distribuyen uniformemente en todas las direcciones del espacio. Es decir en los 4π estereorradianes.

Se puede aumentar el flujo de neutrones que llegan a la muestra aumentando la actividad de la fuente. Una fuente de 5 curios produciría 5 veces más neutrones.

Lo importante para el proceso no son los neutrones emitidos por la fuente sino los que llegan a la muestra. Obviamente si se producen 5 veces más neutrones a igualdad de los demás parámetros llegarán a la muestra 5 veces más neutrones.

En realidad, sólo una parte de estos neutrones llegan a la muestra. La forma de conseguir que lleguen a la muestra un mayor número de neutrones es aumentando el ángulo sólido formado, considerando como vértice la fuente puntual y como sección la correspondiente a la proyección del contorno de la muestra desde el centro de la fuente (Figura 486).

En una primera instancia se pretendió comprobar si sería posible funcionar utilizando los neutrones que salían por el tubo portamuestras del contenedor original y se comprobó que no se obtenían señales significativas. Al acercar la muestra a la fuente, el ángulo sólido

aumenta considerablemente y, por tanto, se tiene un mayor número de neutrones que llega a la muestra.

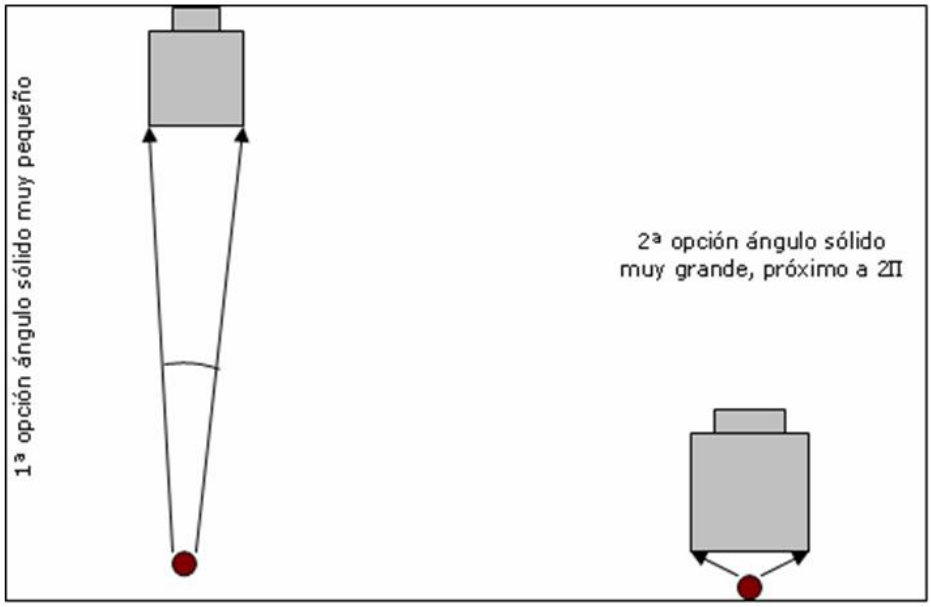


Figura 486. Influencia del ángulo sólido.

En la segunda opción tenemos un ángulo sólido que se aproxima a 2π y por tanto el número de neutrones que llegan a la muestra se aproxima a la mitad de los $3,7*10^{10}$. Esté sería el valor máximo que se podría alcanzar modificando la geometría.

Otra posibilidad que se podría comprobar sería utilizar un reflector tal como el grafito. De manera que se recuperase parte del flujo de neutrones perdido.

De esta manera se podría tener un flujo de neutrones al que se sumaría los neutrones reflejados. Aunque hay que indicar que los reflectores también moderan y que por lo tanto en el perfil de energías de los neutrones reflejados aparecerán energías más bajas. El efecto combinado de los dos procesos tendría que experimentarse y podría ser que mejorase el resultado en una cantidad que lo justifique o que la mejoría fuese simbólica no justificándose por tanto el reflector.

La cantidad de reacciones nucleares de los neutrones con el flúor depende de algunos parámetros fijos y de otros que se puede variar.

Es un parámetro fijo la sección eficaz del flúor con los neutrones para dar la reacción de interés en el equipo. La sección eficaz de la reacción es la probabilidad de que cuando un neutrón choque con un átomo de flúor se produzca la reacción.

El parámetro controlable más importante aquí es la cantidad de flúor que es proporcional al tamaño de la muestra. Se puede por tanto rediseñar el experimento para trabajar por ejemplo con muestras 3 veces más grandes. Esto supondría en principio 3 veces más cuentas.

Cada reacción con los neutrones produce un número fijo de rayos gamma. De todos los rayos gamma producidos una fracción es eficaz y llega al detector de radiación y otra fracción no llega al detector perdiéndose. La fracción efectiva que llega al detector depende de

parámetros geométricos. Fundamentalmente tamaño y geometría del detector. Para la misma geometría el parámetro es el tamaño. En un principio se comenzaron los experimentos con un detector de 3"x3" y debido a su supuesto mal funcionamiento lo sustituimos por uno de 2"x2". En el mercado hay detectores de hasta 6"x6" e incluso mayores.

Finalmente de todos los rayos gamma que llegan al detector solo una fracción de los mismos produce el efecto foto eléctrico o el resto de los efectos necesarios para ser detectados. Aquí entra en juego el rendimiento del detector. Para los detectores del tipo de INa como el que utilizamos este rendimiento está por debajo del 1% para los niveles de energía que se miden.

Existen otros detectores tales como el de germanato de bismuto, BGO que tienen rendimientos en esa misma zona de energía del orden de 10 veces mayor respecto a él de INa. Esto significaría en principio 10 veces más resolución. Es decir que entre punto y punto de ley habría no solo 3 cuentas sino 30 cuentas apreciando por tanto 3 centésimas de punto. Esto por supuesto es necesario comprobarlo.

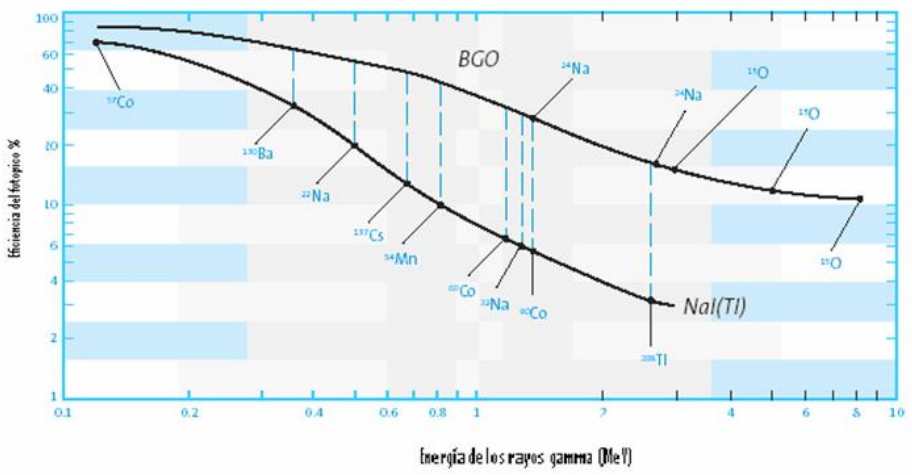


Figura 487. Eficiencia del fotopico para detectores de centelleo de NaI(Tl) y de BGO, de 38mmx38 mm

8.3. Procedimiento básico.

Una muestra de fluorita, irradiada con neutrones, sigue una ley de producción de átomos de 16N siguiente:

$$g(t) = K * \left(1 - e^{-\lambda t}\right) \qquad [18]$$

donde,

- K es un parámetro que depende de
- la concentración en flúor en la muestra,
- del flujo de neutrones y
- de la sección eficaz de la reacción de los neutrones con el flúor,

- λ es la constante de semidesintegración del 16N, y es igual a $\ln 2/T_{½}$, donde,
- $T_{½}$ es el tiempo de semidesintegración de 16N, es decir, 7,13s,
- t es el tiempo durante el cual se está irradiando la muestra.

La ecuación que expresa el valor de g^* es:

$$g^* = \left(\frac{g(t)}{K} \right) \qquad [19]$$

y está representada en la Figura 488. La curva es asintótica y, tiende a 1. Se ha ilustrado en la gráfica una línea horizontal que representa la asíntota, que se ha llamado recta de saturación, porque constituye el máximo valor de 16N.

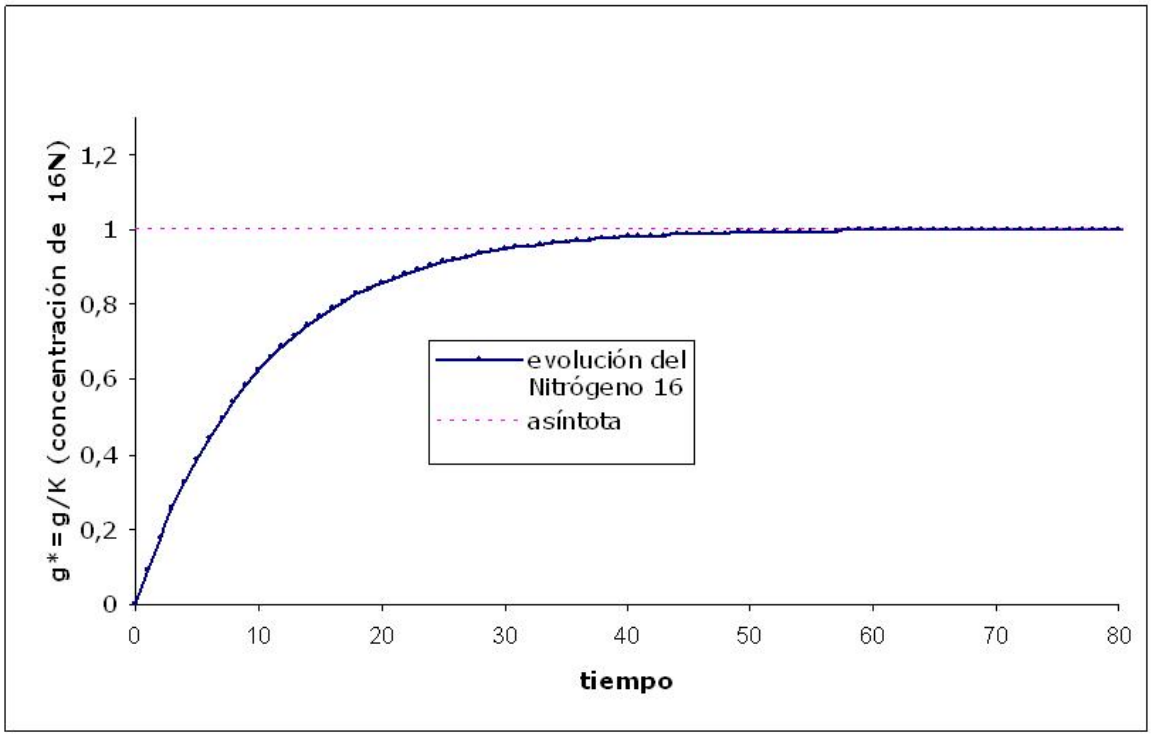


Figura 488. Curva de activación g(t): Evolución de la concentración de 16N durante la irradiación.

En la Tabla 263 se puede ver que si irradiamos un múltiplo del tiempo de desintegración que oscila entre 5 y 16 veces nos acercamos cada vez más al 100% de saturación.

Nº veces T	T= 7,13	% de saturación
5	35,65	96,875
6	42,78	98,438
7	49,91	99,219
8,41	60	99,707
16,83	120	99,999

Tabla 263. Relación entre la vida media y el porcentaje de saturación.

Si mantenemos la muestra irradiando durante un tiempo τ, la concentración de átomos de 16N alcanzada en este punto es:

$$B = g(\tau) = K * \left(1 - e^{-\lambda\tau}\right) \quad [20]$$

Finalizada la irradiación, desplazamos la muestra desde la fuente hasta el detector, y la concentración de 16N comienza a decaer según la expresión que depende del valor B anterior, y que es:

$$h(t) = B * e^{-\lambda(t-\tau)}$$

Por lo que,

$$h(t) = K * \left(1 - e^{-\lambda\tau}\right) * \left(e^{-\lambda(t-\tau)}\right) \quad [21]$$

Donde t está referido al inicio de la irradiación.

En la Figura 489, se han representado, junto con la curva de activación $g^*=100(g(t)/K)$, dos curvas de decaimiento:

- la primera $h_1^*=100(h(t,\tau_1)/K)$, se produce después de un tiempo de irradiación de τ_1=35,6 s, que equivale a cinco veces el tiempo de desintegración del 16N.
- La segunda, $h_2^*=100(h(t,\tau_2)/K)$, representa al decaimiento después de τ_2=60 s. de irradiación.

Se observa que

- 1 s. después de 35,6 s de activación, la concentración en 16N es de 92%,

mientras que si aumentamos el tiempo de irradiación a 60 s.:

- conseguimos estar más cerca de la saturación, (99,70%),
- pero, la concentración instantánea 10 s más tarde del fin de la irradiación, baja hasta el valor de 39%.

Así, de esta gráfica se deduce la importancia *relativa* que tiene el tiempo de activación en el proceso y que, para obtener una mayor lectura, no es suficiente con activar más tiempo, sino que hay que plantear de una manera conjunta el proceso de irradiación y el de lectura.

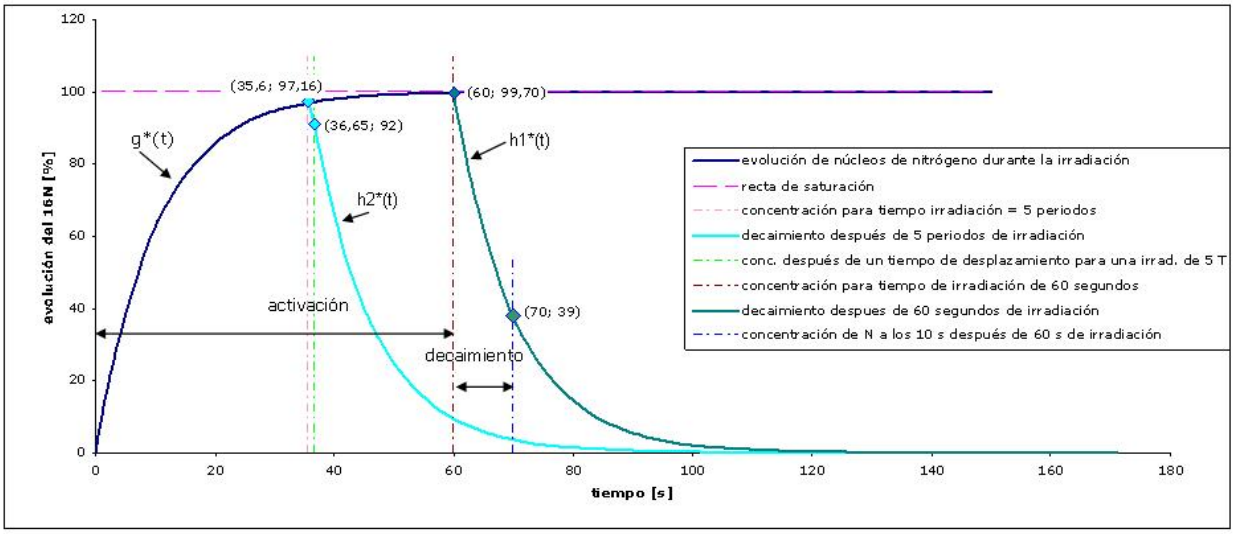


Figura 489. Evolución de los valores relativos de 16N presentes en la muestra según el tiempo, en un proceso de activación neutrónica.

El sistema de detección de la radiación puede producir una señal instantánea proporcional a la concentración en ese mismo instante, reflejada en la curva h(t), pero los equipos de detección y registro utilizados en los ensayos, miden integrando todas las lecturas registradas durante un intervalo de tiempo determinado, tiempo de medida, por lo que, realmente, miden el área "A" bajo la curva representada por la ecuación h(t), entre los valores τ y T. El área A, es, entonces, a lo que se refiere el término "señal" o "lectura·" en esta tesis. Este hecho, unido a la explicación anterior nos lleva a un cambio en el planteamiento del problema.

8.3.1. Tiempo de lectura óptimo para dar una señal máxima.

Hasta ahora, se había planteado que, si deseamos aumentar la lectura frente a una muestra activada:

- cuanto mayor fuera el tiempo de activación más nivel de señal se tendría.
- a medida que el tiempo de activación creciera, la ganancia de señal conseguida con un nuevo incremento sería cada vez menor y por lo tanto cada vez interesaría menos aumentar el tiempo de activación.
- cuanto mayor fuera el tiempo de lectura mayor sería el nivel de señal que se tendría.
- y, por último, que a medida que el tiempo de lectura creciera, la ganancia de señal conseguida con un nuevo incremento sería cada vez menor y por lo tanto cada vez interesaría menos aumentar el tiempo de lectura.

En el planteamiento actual, se deja de pensar individualmente en el tiempo de activación y el tiempo de lectura y se pasa a pensar en el

tiempo conjunto de ambas acciones. A este tiempo conjunto le llamamos tiempo de un ciclo, y se le considera un factor de diseño inicial. En el estudio hemos establecido este valor en torno a los seis minutos para cada análisis.

Para un tiempo de ciclo "*T*" de proceso determinado, se busca la evolución del área *A* en función del tiempo de activación τ, en cuyo caso, el tiempo de lectura es T-τ. Queremos ver, para un intervalo del ciclo de irradiación – medida, de valor constante *T*, como el de la Figura 490, el valor de τ que hace máximo el área A.

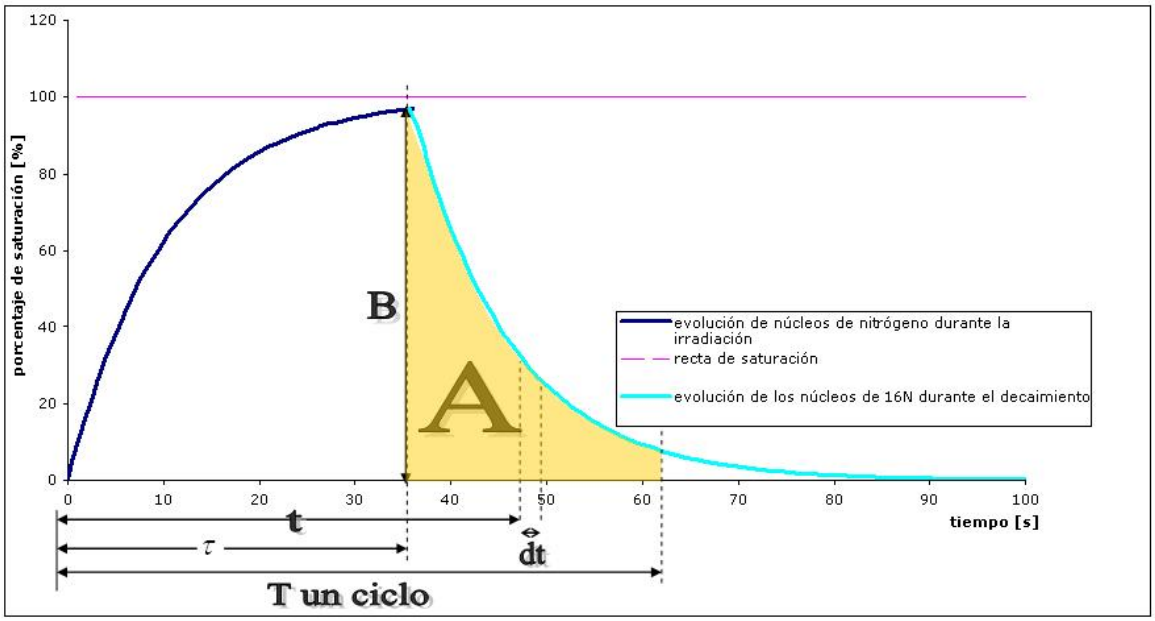


Figura 490. Ciclo de un periodo de irradiación y un periodo de medida.

La expresión A=h(T,τ) que relaciona el área bajo la curva, con los tiempos de comienzo y fin de la lectura se obtiene integrando la ec. [21]entre los valores τ y T,

$$A = \int_{\tau}^{T} h(t)dt = \int_{\tau}^{T} Be^{-\lambda(t-\tau)}dt = \int_{\tau}^{T} K(1-e^{-\lambda\tau})e^{-\lambda(t-\tau)}dt \qquad [22]$$

De donde,

$$A = K(1-e^{-\lambda\tau})\int_{\tau}^{T} e^{-\lambda(t-\tau)}dt = K(1-e^{-\lambda\tau})\frac{-1}{\lambda}\left[e^{-\lambda(t-\tau)}\right]_{\tau}^{T}$$

$$A = -\frac{K}{\lambda}(1-e^{-\lambda\tau})\left[e^{-\lambda(T-\tau)} - e^{-\lambda(\tau-\tau)}\right],$$

De donde se llega a la expresión final:

$$A = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)\left(1-e^{-\lambda(T-\tau)}\right) \qquad [23]$$

O bien,

$$A^* = A\frac{\lambda}{K} = \left(1-e^{-\lambda\tau}\right)\left(1-e^{-\lambda(T-\tau)}\right) \qquad [24]$$

Representamos la función A*, manteniendo constante T y variando el tiempo de irradiación τ (Figura 491).

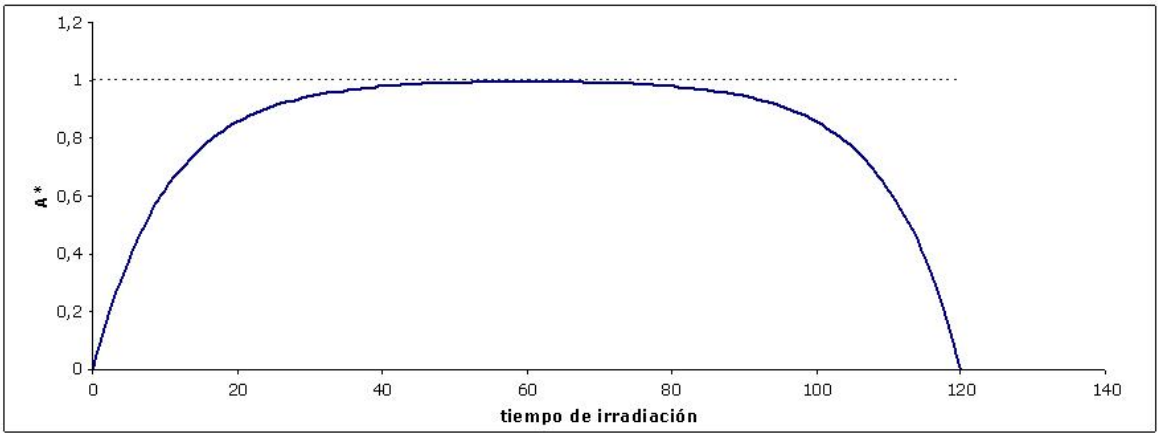


Figura 491. A* para un tiempo de irradiación variable y un tiempo de ciclo constante, T=120 s. A*= $(1-e^{(-\lambda^*\tau)})*(1-e(-^{\lambda^*(120-\tau)}))$

Para cada valor de T, la función tiene un máximo, el cual se produce en un tiempo de irradiación τ, determinado, que, matemáticamente, se encuentra derivando la ecuación anterior e igualándola a cero, manteniendo T constante. Es decir,

$$\frac{dA^*}{d\tau} = \left[\left(1-e^{-\lambda(T-\tau)}\right)\frac{d}{d\tau}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right) + \left(1-e^{-\lambda\tau}\right)\frac{d}{d\tau}\left(1-e^{-\lambda(T-\tau}\right)\right] = 0$$

Se tiene que:

$$\left(1-e^{-\lambda(T-\tau_{op})}\right)\left(-(-\lambda)e^{-\lambda\tau_{op}}\right) + \left(1-e^{-\lambda\tau_{op}}\right)\left(-\lambda e^{-\lambda(T-\tau_{op})}\right) = 0$$

De donde,

$$\lambda e^{-\lambda\tau_{op}}\left(1-\frac{e^{-\lambda T}}{e^{-\lambda\tau_{op}}}\right) = \lambda\frac{e^{-\lambda T}}{e^{-\lambda\tau_{op}}}\left(1-e^{-\lambda\tau_{op}}\right)$$

Operando,

$$e^{-\lambda\tau_{op}}\left(\frac{e^{-\lambda\tau_{op}}-e^{-\lambda T}}{e^{-\lambda\tau_{op}}}\right) = e^{-\lambda T}\left(\frac{1-e^{-\lambda\tau_{op}}}{e^{-\lambda\tau_{op}}}\right)$$

De donde,

$$e^{-\lambda\tau_{op}-\lambda\tau_{op}} - e^{-\lambda T-\lambda\tau_{op}} = e^{-\lambda T} - e^{-\lambda T-\lambda\tau_{op}}$$

Por lo que,

$$e^{-2\lambda\tau_{op}} - e^{-\lambda(T-\tau_{op})} = e^{-\lambda T} - e^{-\lambda(T-\tau_{op})}$$

Finalmente, se tiene que el máximo de la función A para un valor de tiempo de ciclo T constante, se obtiene cuando:

$$\tau_{op} = T/2 \qquad [25]$$

El valor de *A* en dichas condiciones sería:

$$A_{\max} = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2}\right)*\left(1-e^{-\lambda*(T-T/2)}\right) = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2}\right)*\left(1-e^{-\lambda T/2}\right),$$

de donde,

$$A_{\max} = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2}\right)^2 \qquad [26]$$

o bien, en valores relativos podemos expresar como

$$A^*_{\max} = \left(1-e^{-\lambda T/2}\right)^2 \qquad [27]$$

En la Figura 492, se representa el valor de $A^*=A\lambda/K$ en relación con τ, para un tiempo de ciclo T, constante e igual a 120 s., y su derivada y se observa como el máximo se alcanza cuando la derivada es igual a cero, es decir, en el caso de un tiempo de irradiación T=120 s, cuando $\tau=\tau_{op}=60$s.

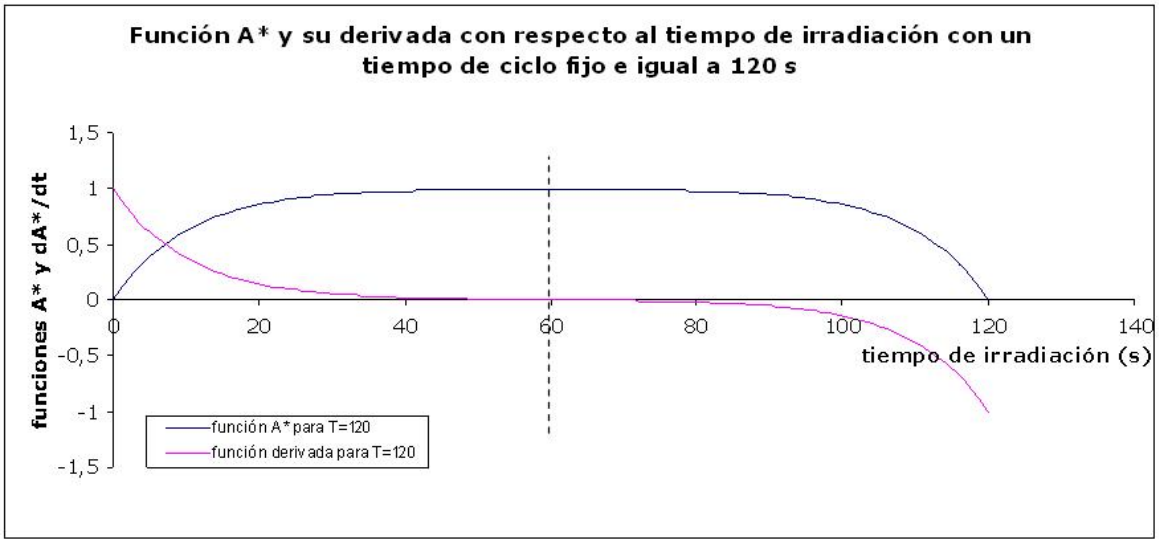


Figura 492. Representación de la función A* y su derivada con respecto a τ, para un tiempo de ciclo constante e igual a 120 s. $A^*= (1-e^{(-\lambda^*\tau)})*(1-e^{(-\lambda^*(120-\tau))})$ y dA/dt.

Una primera conclusión de esta exposición es, que para cualquier valor del tiempo de que se disponga para hacer una medida, es decir, sea cual sea el tiempo de ciclo de proceso, el máximo de señal se obtiene cuando se lee durante un tiempo exactamente igual al tiempo de activación, y vale A_{max} que es el resultado de la ec. [26].

El máximo valor que alcanza la función A* tiende a 1, cuando el tiempo de ciclo de irradiación más lectura (T), tiende a infinito. Para valores pequeños del tiempo de ciclo, el máximo valor que alcanza la función es considerablemente menor.

En la Figura 493 se representan las distintas curvas de la evolución de A* en función del tiempo de irradiación τ, obtenidas con diferentes tiempos de proceso, que varían entre 20 y 200 s.

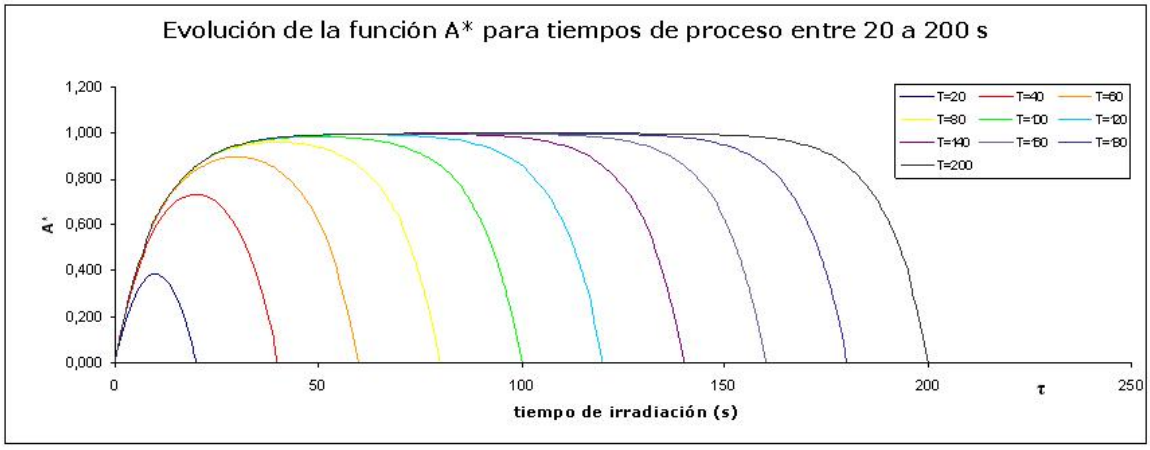


Figura 493. Evolución de la función A* para distintos tiempos de proceso.

$$A^* = (1-e^{(-\lambda^*\tau)})*(1-e(-^{\lambda^*(T-\tau)}))$$

De este análisis se concluye lo siguiente:

- Es muy importante elegir bien los parámetros de tiempo de activación y de tiempo de lectura, ya que existe un amplio rango de posibilidades que dan lugar al mismo nivel de señal utilizando distinta cantidad del recurso que consideramos escaso, esto es el tiempo total de ciclo T.
- Para tiempos de ciclo elevados el máximo se alcanza con una forma de curva que se parece cada vez más a una meseta (aunque nunca se llega a alcanzar la forma de recta horizontal de esa meseta lo que es cierto es que cada vez es menos puntiaguda). En consecuencia:
  - Para valores de tiempo de ciclo pequeños es mucho más importante activar exactamente al valor óptimo ya que pequeñas desviaciones producen importantes pérdidas de señal.
  - De la misma manera para valores de tiempo de ciclo grandes se tiene mucha más flexibilidad y es posible realizar la activación con un amplio rango de valores de tiempo produciéndose solamente una pequeña pérdida de señal respecto a la situación óptima.
    - El valor óptimo de la magnitud de la señal leída crece con el tiempo de ciclo.
    - La magnitud de la señal también crece con el tiempo de ciclo.

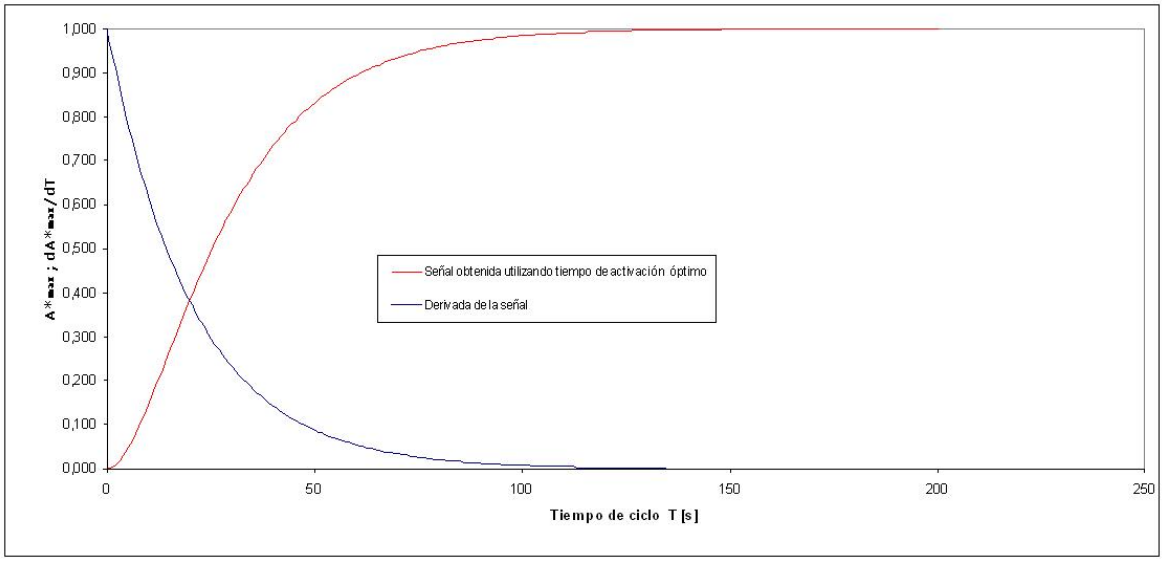


Figura 494. Evolución de la señal relativa $A^*_{\max}$, en función del tiempo de ciclo con tiempos de irradiación iguales a T/2.

En la Figura 494 se representa la evolución de $A^*_{\max} = A_{\max}\lambda / K$ en función del tiempo de ciclo, considerando que hemos adoptado el tiempo de activación óptimo para esos tiempos de ciclo, es decir T/2. También se representa la derivada de dicha función.

De esta gráfica se obtiene la siguiente conclusión.

[1] Cuanto mayor es el tiempo de ciclo, mayor es la magnitud de la señal.

[2] Cuanto mayor es el tiempo de ciclo la ganancia relativa de la señal es cada vez menor como puede verse en el valor de la derivada.

8.3.2. Influencia del fondo en el tiempo óptimo de lectura.

En el estudio anterior no se ha contemplado:

- La ley de las muestras. La ley de la muestra forma parte de un grupo de parámetros que conjuntamente hemos llamado K, y del que se ha prescindido en las gráficas anteriores, al representar $A^*=A\lambda/K$ en vez de A.
- La señal de fondo. En el punto 6.1.1 y en la Figura 439 se hizo una previsión de la influencia del fondo en la respuesta de la muestra.

Deseamos ahora estimar la influencia teórica del fondo, en la señal producida por la activación de muestras de diferente ley, teniendo en cuenta las conclusiones anteriores. Para ello, nos basamos en las medidas tomadas con los prototipos realizados, en muestras de leyes 60% y 4% en fluorita, así como las lecturas de fondo.

Buscamos entre las experiencias realizadas, que no se hicieron según el procedimiento descrito anteriormente, los resultados alcanzados, y, estimamos los valores que podríamos haber obtenido en una realización de un ciclo óptimo. Estas estimaciones son las reflejadas en la Tabla 264.

MUESTRAS			FONDO	
Tiempo de ciclo 50 s.	Ley	Cuentas	Tiempo de lectura s.	Cuentas
	~60	~125	25	Entre 15 y 30
	~4	~21		

Tabla 264. Estimación de los valores alcanzados por A ante muestras de diferente ley y ante el fondo.

Construimos la siguiente figura, que es una modificación de la Figura 494, en la que los valores de las curvas correspondientes a la señal se han multiplicado por un coeficiente, de tal manera que la asíntota de la curva no se sitúa, como anteriormente, en 1 sino que se sitúa en el valor estimado por la Tabla 264 tanto para las muestras como para el fondo. Estas curvas se han llamado *A* modificada*:

- 1a y 1b. Corresponden a la función A* modificada y a su derivada, respectivamente, definidas para una ley del 60%. La primera curva se ha representado de tal forma que alcanza el valor 125 en tiempos de ciclo de 50 s.
- 2a y 2b. Lo mismo que la anterior pero para muestras de ley 4%. La curva 2a. representa en este caso, a la función A* modificada, que alcanza el valor de 21 cuentas para tiempos de ciclo de 50 s.
- 3a y 3b. Rango inferior del intervalo de fondos. La primera recta representa los valores **acumulados**, que alcanza el valor de 15 cuentas en tiempos de lectura de 25 s, y la segunda representa su derivada.
- 4a y 4b. Lo mismo que en el caso anterior, pero para el rango superior.

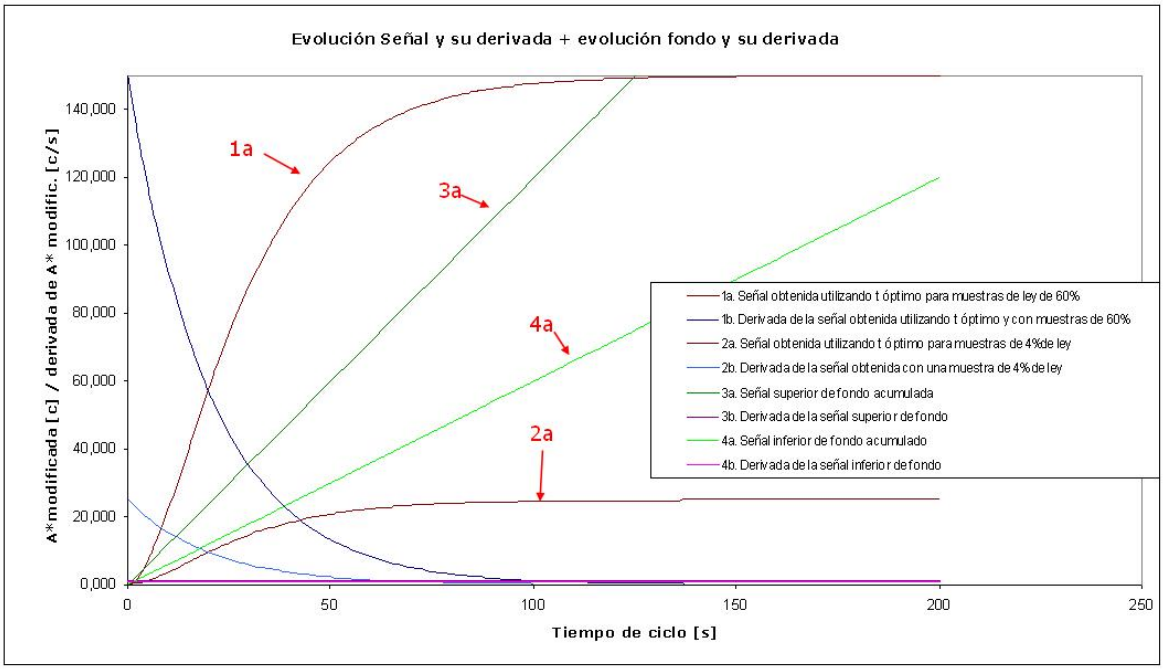


Figura 495. Evolución de la señal para muestras de leyes de fluorita de 4 y 60% y evolución de la señal para el fondo en base a lecturas realizadas en el laboratorio con los distintos prototipos.

A través de las curvas 1b y 2b se ve la pendiente de las curvas 1a y 2a, y en ellas se observa como la variación de la señal en los primeros instantes decrece rápidamente. En cambio, las líneas que representan al fondo son rectas y su variación es constante. La Figura 496 y la Figura 497 son una ampliación de la anterior, y permiten ver con mayor nitidez los puntos de corte de las curvas.

De estas figuras, en un primer análisis, se deduce que:

[1] el fondo no va a influir en la determinación del tiempo de ciclo y de todos los procesos posteriores.

[2] Sin embargo para leyes de valor bajo puede ser que sí influya incluso se puede dar una situación para leyes muy bajas en las cuales el análisis no se pueda efectuar. Un objetivo es valorar esa situación de mínimo. Es decir a medida que la ley es más baja se produce el corte de su derivada con la derivada del fondo para un valor de tiempo cada vez más pequeño. Habrá un momento en que si la ley es inferior a un valor dado ese tiempo en el que se produce el corte será tan pequeño que no resultaría viable el análisis.

La conclusión que se extrae es:

a. mientras el tiempo de un ciclo de activación más medida sea inferior al tiempo de corte de las dos derivadas, situación que se dará en la totalidad de los casos, **el fondo no influye en las ecuaciones de optimización del tiempo.**

Para encontrar los puntos de corte ampliamos la figura anterior y vemos que en la Figura 496 el punto de corte está en tiempos de proceso de unos 113 s., y en la Figura 497 con tiempos de proceso de unos 80 s.

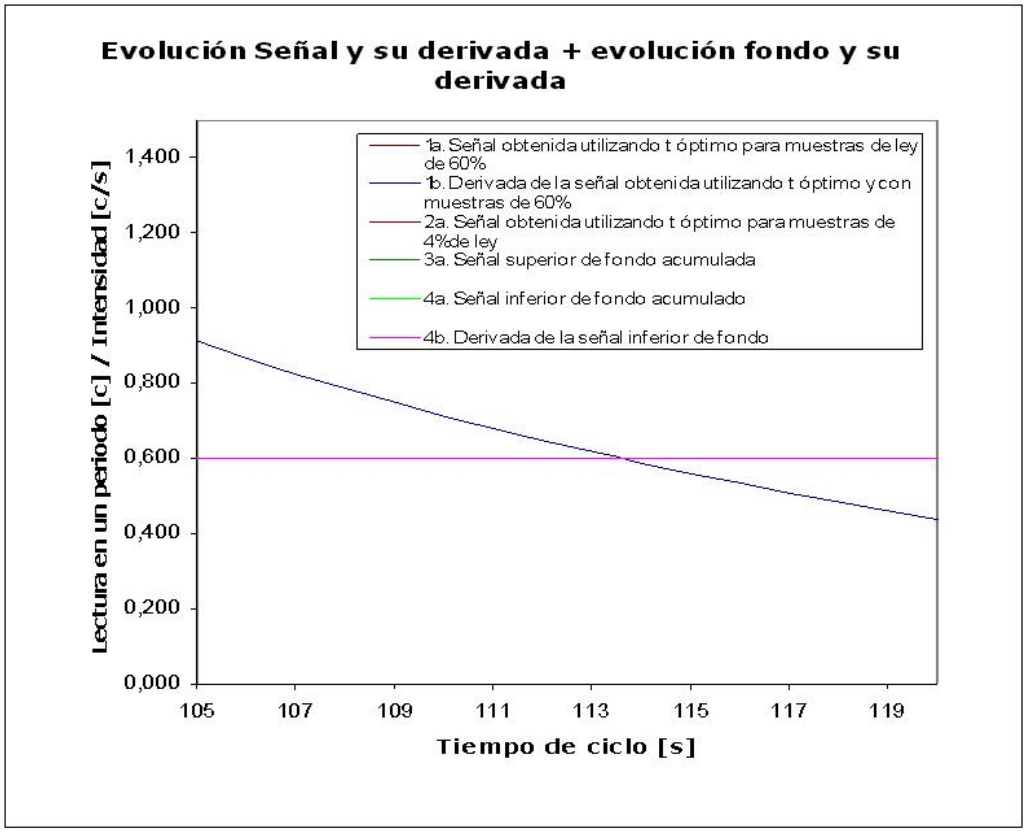


Figura 496. Intersección de la derivada de la señal con muestras del 60%, y la derivada de la señal inferior del fondo.

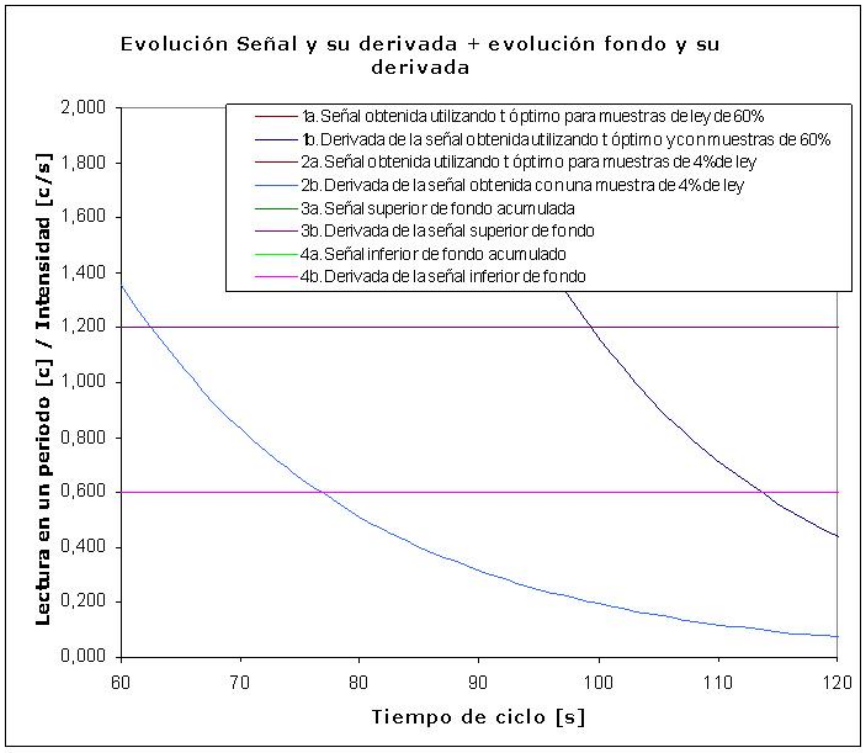


Figura 497. Intersecciones de las derivadas de la señal para muestras de ley 60 y 4%, y de las derivadas de la señal superior e inferior del fondo.

A través de la Figura 498, basada en la Figura 495 de la página 487, se aprecian estos puntos de corte, y además se han incorporado cuatro nuevas curvas que representan la relación señal- fondo para ambas leyes y con sendos fondos. Se ve que la relación señal ruido aumenta hasta alcanzar un valor máximo de tiempo de proceso que oscila en torno a los 26 o 27 s.

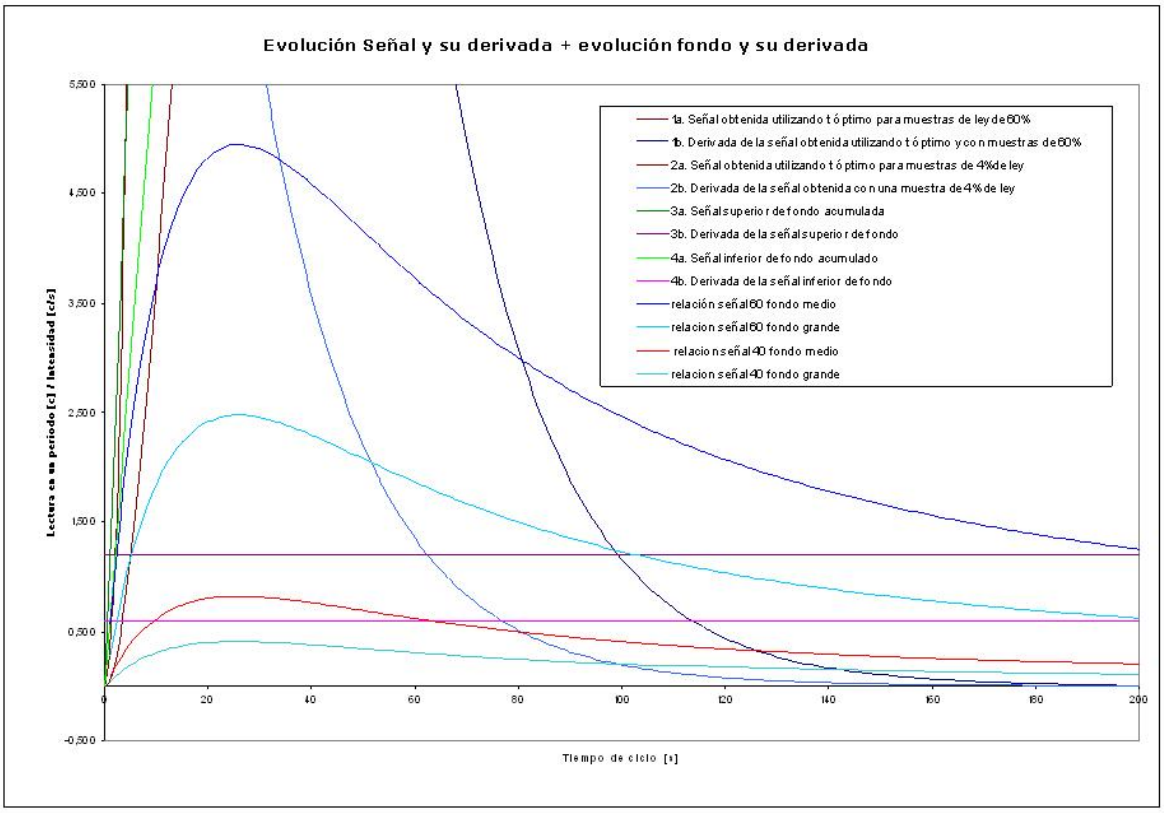


Figura 498. Detalle de la Figura 495 en las que se ha incorporado las curvas de relación señal/fondo para ambas leyes.

8.4. Ciclo repetido.

Se observa en las Figura 493 y Figura 494, cómo a partir de cierto valor de tiempo de proceso T, A* alcanza un valor de señal leída por el detector cercana al valor máximo posible. Es decir, no se consigue mayor señal incrementando el tiempo de proceso. Por otra parte, como se ha dicho anteriormente, el máximo valor de A* se alcanza si se irradia la muestra durante un tiempo τ que es la mitad del tiempo de proceso. Por ejemplo, se puede plantear un tiempo de proceso de 120 s, y el máximo de señal se lograría con un tiempo de irradiación de τ=60s. y un tiempo de lectura de 60s.

A la vista de los resultados experimentales obtenidos, y del escaso número de cuentas alcanzado en los experimentos, incluso con muestras de alta ley, se plantea ahora la posibilidad de amplificar las lecturas:

[1] empleando los tiempos de activación óptimos, como los resultantes del punto anterior, y, sobre todo,

[2] usando algún procedimiento operativo especial.

Es decir, se plantear estudiar **un procedimiento** que permita **incrementar** el valor de esta área usando **el mismo equipo** de activación y medida.

Se ha tenido la idea de aumentar el valor de A utilizando el mismo ciclo de proceso total T, pero dividido en varios ciclos (n) de irradiación y lectura consecutivos, de duración individual de cada ciclo T/n, tal como se explica a continuación.

Sea, como en el caso anterior un tiempo de proceso total T. Supongamos que dividimos el tiempo total en n ciclos parciales iguales, de tiempo de proceso para cada ciclo igual a T/n, y la secuencia consecutiva n veces cada uno de estos ciclos.

En este caso, el área total sería la suma de las áreas parciales, cada una de las cuales respondería a la ec. [23]. En consecuencia,

- Área total para un ciclo de proceso de duración T/n:

$$A^{1ciclo} = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)*\left(1-e^{-\lambda((T/n)-\tau)}\right) \qquad [28]$$

y el valor máximo de esta función se produce, como se ha visto anteriormente para τ=T/2n y valdría, según la ecuación [26]:

$$A_{\max}^{1ciclo} = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2 \qquad [29]$$

- Si repetimos n veces el ciclo, el área total es el resultado de multiplicar por n la ecuación [28], de donde,

$$A^{nciclos} = n\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)*\left(1-e^{-\lambda((T/n)-\tau)}\right) \qquad [30]$$

- De donde, si tenemos n ciclos iguales, el área máxima para n ciclos, cada uno de ellos optimizado pues se ha activado un periodo que equivale a la mitad del tiempo de ciclo, es:

$$A_{\max}^{nciclos} = \frac{nK}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2 \qquad [31]$$

La representa

$$A_{\max}^{*nciclos} = A_{\max}^{nciclos}\lambda/K = n\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2 \qquad [32]$$

para n=1, 2, 3, 6 y 12 ciclos de 120s, 60s, 40s, 20s, 10s y 5 s., respectivamente cada ciclo según la Figura 499. (Se ha seleccionado como tiempo de proceso de un ciclo T=120s, pues es un número que

presenta numerosos divisores). En la gráfica también se observa el máximo valor de $A^{*nciclos}$.

Tiempo de cada ciclo	T=120	T=60	T=40	T=20	T=10	T=5
Número de ciclos n	1	1	1	1	1	1
		2	3	6	12	24

Tabla 265. Ciclos múltiples para tiempo de proceso total de 120 s.

Se deduce de la figura, una importante conclusión que muestra el camino para conseguir, con la misma muestra y el mismo equipo, registrar una señal mayor:

[1] Se ve que, activando durante 6 ciclos de un tiempo individual de cada ciclo de 20s en vez de un solo ciclo de 120 s., la señal se puede estimar que pasa a ser 2,319 respecto a 0,994 que era en el caso de un solo ciclo.

[2] Sin embargo, también se comprueba que si seguimos aumentamos el número de ciclos, la respuesta relativa no se incrementa, sino que disminuye, ya que se pasa de 2,319 a 1,778 con 12 ciclos de 10 segundos, e incluso a 1,073 con 24 ciclos de 5 s.

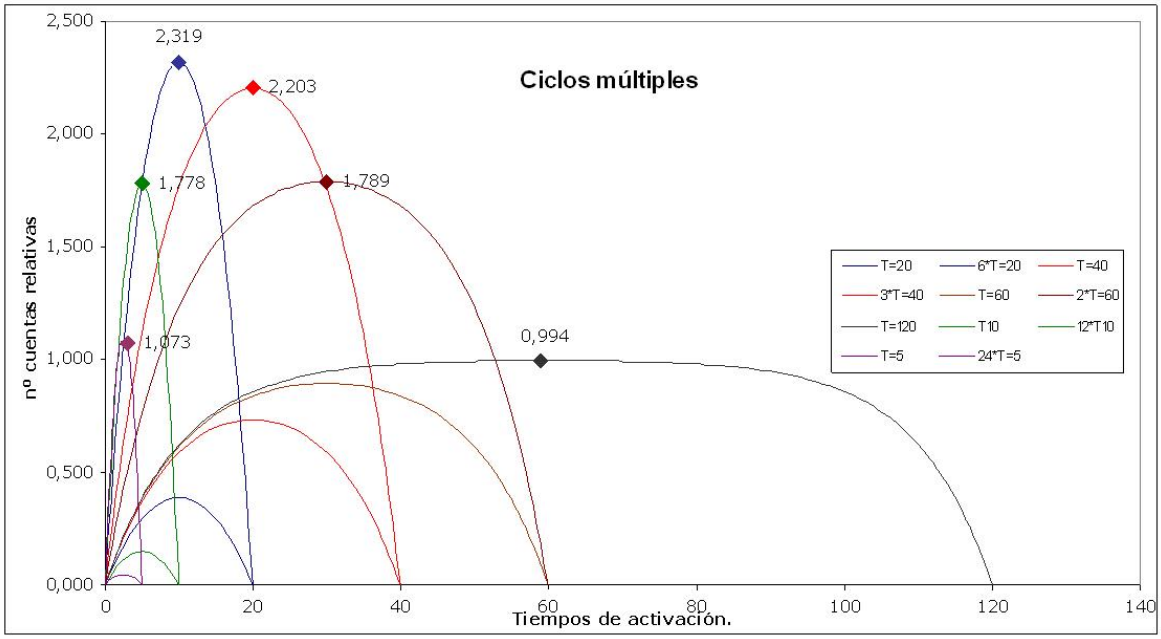


Figura 499. $A^{*1ciclo}$ y $A^{*nciclos}$ (cuentas relativas) usando el mismo tiempo de proceso con distintos ciclos múltiples.

Es decir, el método propuesto permite aumentar la señal en una proporción que, si se analiza adecuadamente, es muy importante. Una vez en este punto, nos planteamos la necesidad de diseñar adecuadamente el análisis para encontrar el número de ciclos óptimo para cada tiempo de proceso.

8.4.1. Evolución de la señal en relación con el número de ciclos de activación para unos tiempos de proceso determinados.

Vamos a representar la ecuación [31] en un gráfico en la que el eje de abscisas es el número de activaciones n y el eje de ordenadas es $A_{\max}^{*nciclos} = A_{\max}^{nciclos}\lambda / K$, para un tiempo de proceso determinado de 120 s. El resultado es la Figura 500. Tal como se ha expresado anteriormente, al aumentar el número de activaciones aumenta la señal, hasta llegar a un máximo, y después la señal se reduce llegando, a partir de un determinado punto a ser menor que el valor de partida.

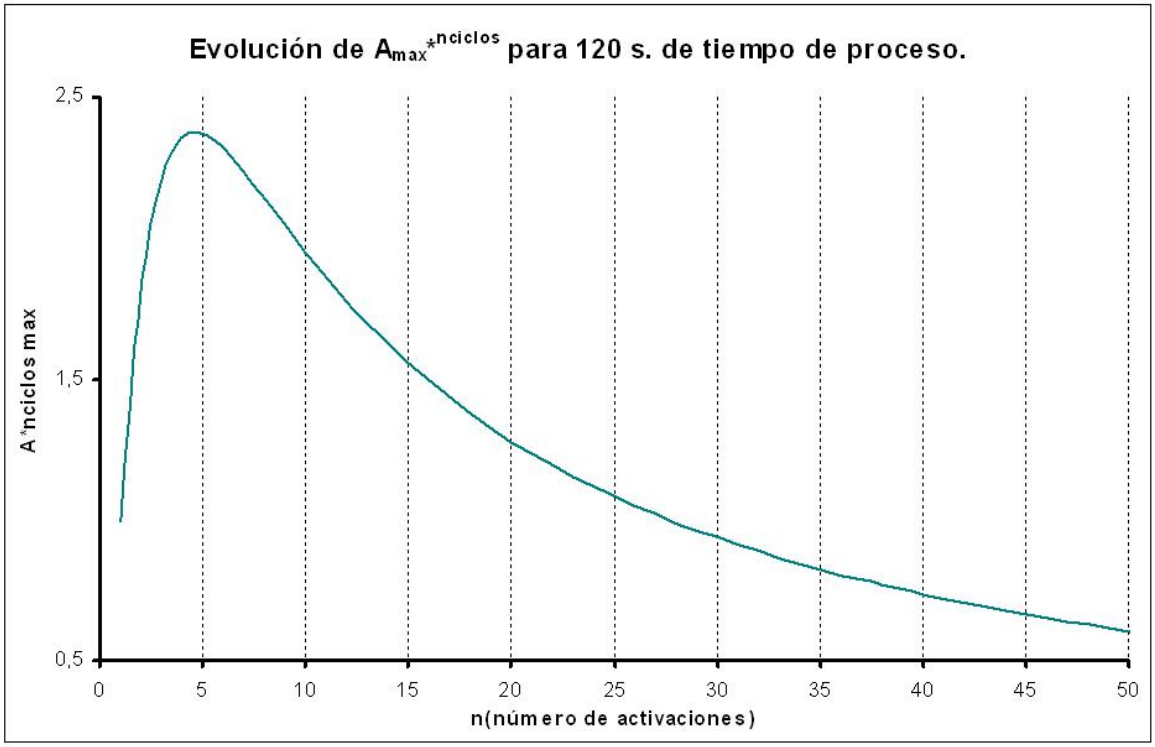


Figura 500. $A_{\max}^{*nciclos} = A_{\max}^{nciclos}\lambda / K$**, para un tiempo de proceso de 120 s, según el número de activaciones.**

Si repetimos esta simulación para distintos tiempos de proceso T, obtendremos la Figura 501 donde se observa como, sea cual sea T la tendencia general de las curvas es, en el primer tramo ascendente, y después descendente. Esto significa que existe un valor de n, en el que se obtiene una señal máxima.

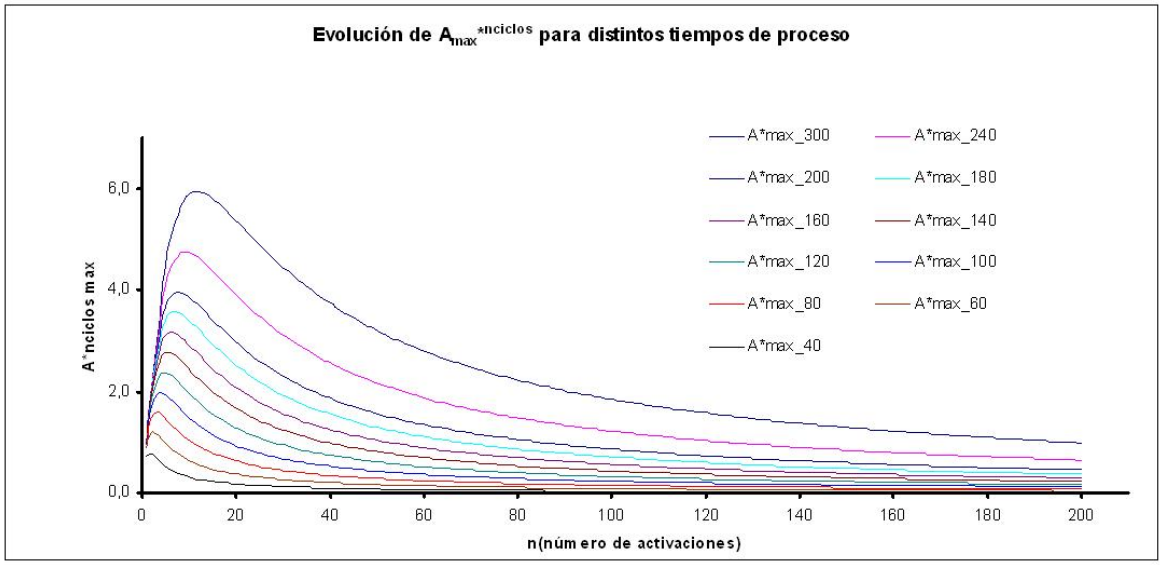


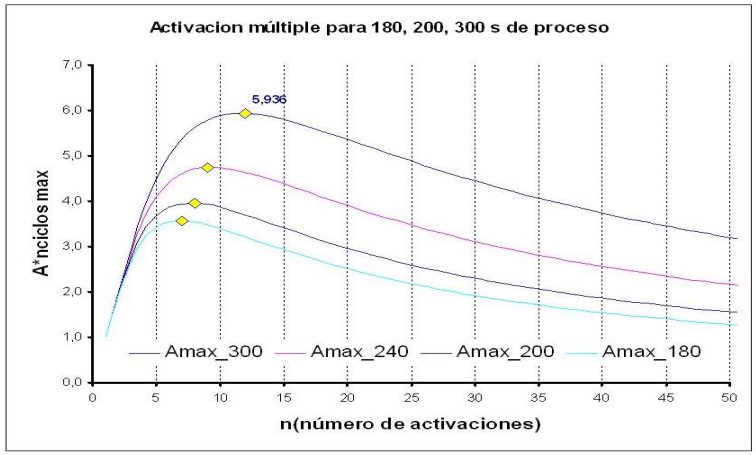
Figura 501. Evolución de $A_{\max}^{*nciclos}$ según el número de activaciones, para distintos tiempos de proceso, según la ecuación [31].

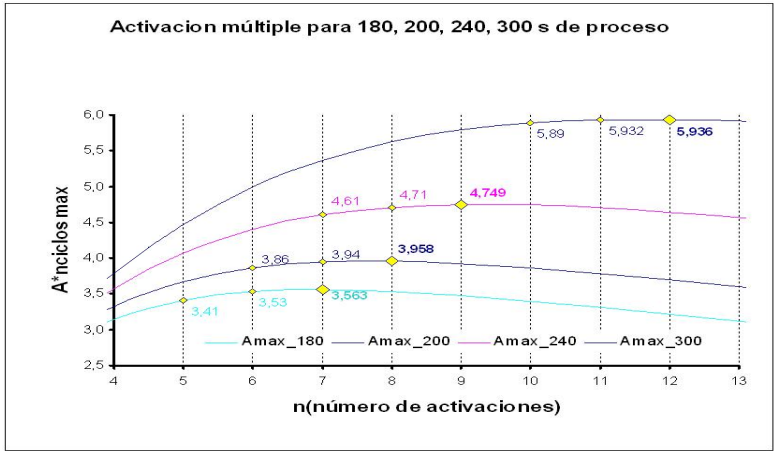
En la siguiente tabla, se muestran algunos de los valores de estas curvas hasta cinco ciclos de repetición del proceso.

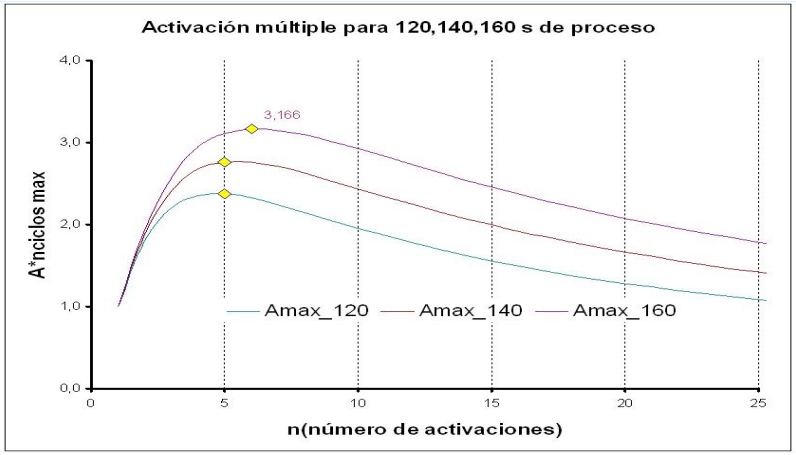
T / N	300	240	200	180	160	140	120	100	80	60	40
1	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,998	0,994	0,985	0,959	0,895	0,734
2	1,997	1,988	1,969	1,950	1,919	1,869	1,789	1,663	1,469	1,178	0,773
3	2,954	2,878	2,770	2,684	2,568	2,411	2,203	1,930	1,583	1,160	0,682
4	3,794	3,579	3,327	3,153	2,937	2,674	2,355	1,979	1,546	1,072	0,593
5	4,473	4,077	3,672	3,413	3,112	2,765	2,371	1,933	1,461	0,977	0,519

Tabla 266. Valores de $A_{\max}^{*nciclos}$ según T y n.

Para buscar gráficamente el valor de n que hace máximo $A_{\max}^{*nciclos}$ volvemos a representar la Figura 501 en la zona de número de activaciones más bajo. El resultado se observa en la Figura 502 y Figura 503 y se resume en la Tabla 267.







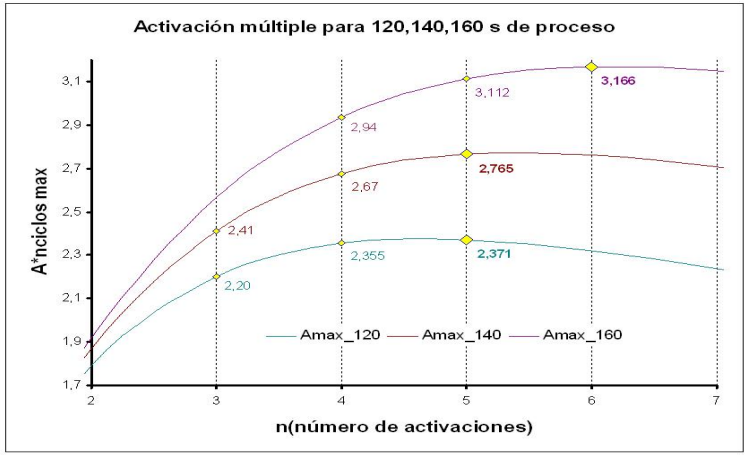
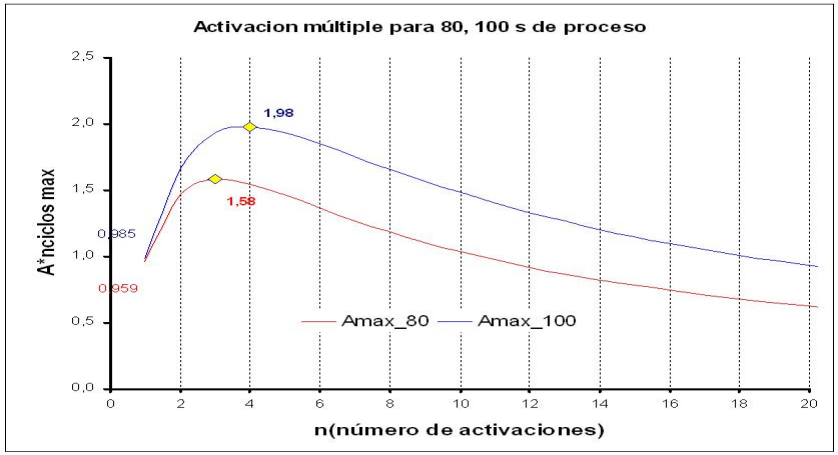
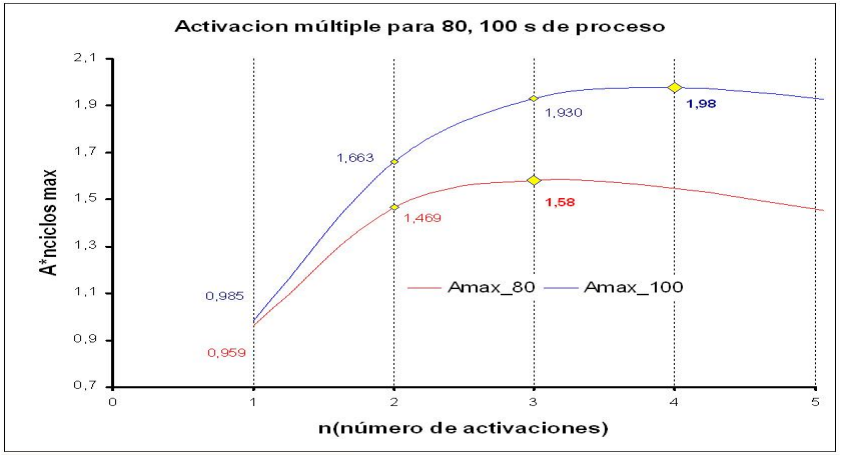
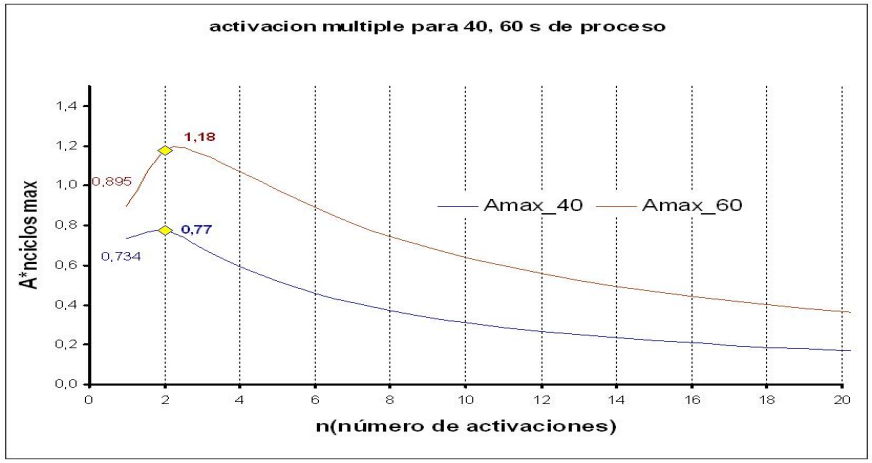


Figura 502. Representación en detalle de las curvas de la Figura 501.







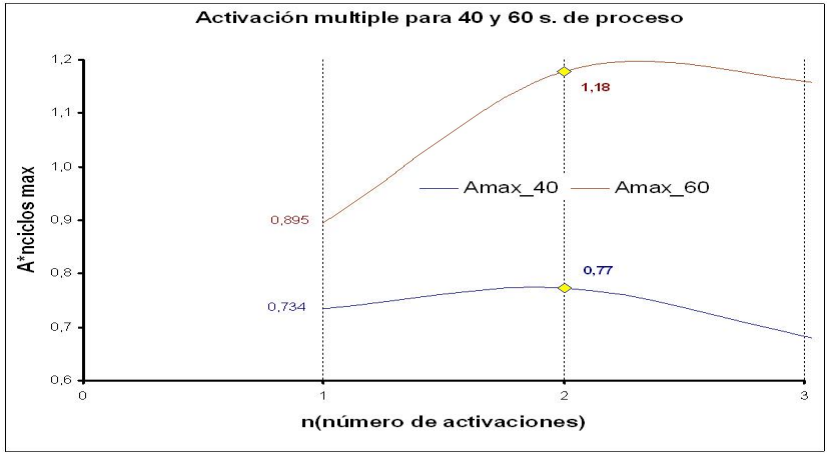


Figura 503. Representación en detalle de las curvas de la Figura 501.

Tiempo de proceso	$A_{\max}^{*nciclos}$	Número de ciclos óptimo
300	5,936	12
240	4,749	9
200	3,958	8
180	3,563	7
160	3,166	6
140	2,765	5
120	2,371	5
100	1,98	4
80	1,58	3
60	1,18	2
40	0,77	2

Tabla 267. Valores de la magnitud máxima leída ajustada al número natural de ciclos más cercano al óptimo para cada tiempo de proceso.

Si repetimos el proceso pero representando esta vez el número de activaciones *n versus* la ganancia G respecto al hecho de haber activado un solo ciclo, es decir, la ecuación siguiente:

$$G = \frac{A_{\max}^{nciclos}}{A_{\max}^{1ciclo}} = \frac{A_{\max}^{*nciclos}}{A_{\max}^{*1ciclo}}$$

de donde,

$$G = n\frac{\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2}{\left(1-e^{-\lambda T/2}\right)^2} \qquad \textbf{[33]}$$

se observa que el resultado, (Figura 503 y Tabla 268), es casi el mismo en determinados casos, puesto que $A_{\max}^{*1ciclo}$ en el divisor de la ecuación [33] es prácticamente 1 en T mayores de 180 s.

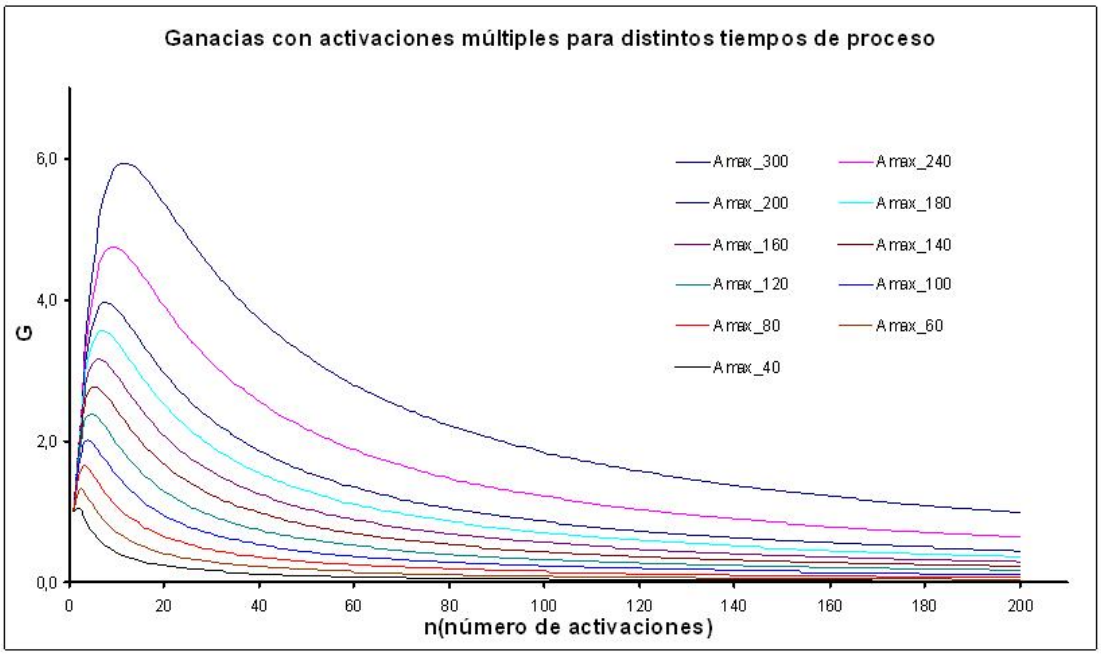


Figura 504. Ganancia relativa G con activaciones múltiples para distintos tiempo de proceso entre 40 s y 300 s. según la ec. [33].

T / N	300	240	200	180	160	140	120	100	80	60	40
1	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,998	0,994	0,985	0,959	0,895	0,734
2	1,997	1,988	1,969	1,951	1,921	1,873	1,800	1,690	1,531	1,316	1,053
3	2,954	2,878	2,770	2,685	2,570	2,417	2,216	1,961	1,650	1,296	0,929
4	3,794	3,579	3,327	3,154	2,940	2,679	2,369	2,010	1,612	1,198	0,807
5	4,473	4,077	3,672	3,414	3,114	2,771	2,385	1,963	1,523	1,092	0,707

Tabla 268. Valores de G para distintos T y n.

De estas gráficas se deduce lo siguiente:

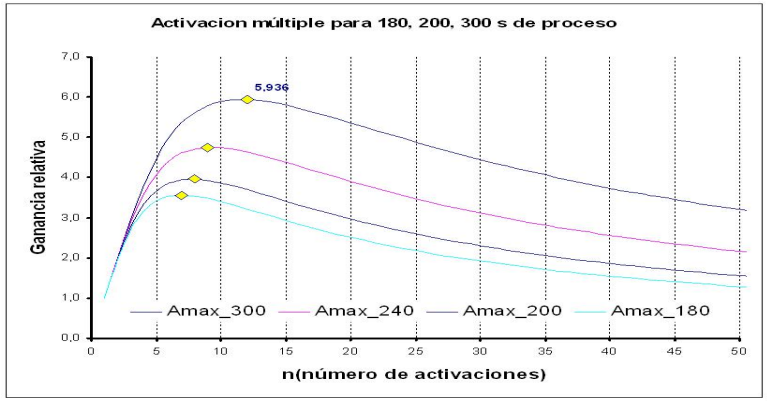
[1] Sea cual sea el tiempo de proceso, se puede hacer uno o varios ciclos de activación – lectura, y los resultados pueden variar.

[2] La mejora respecto a hacer una sola activación puede ser muy elevada si se selecciona correctamente el número de ciclos.

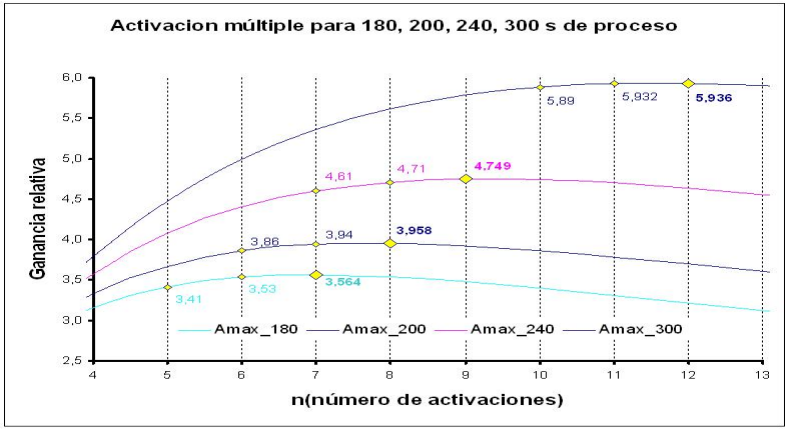
[3] Si no se selecciona el número de ciclos adecuado, la ganancia puede ser poco significativa.

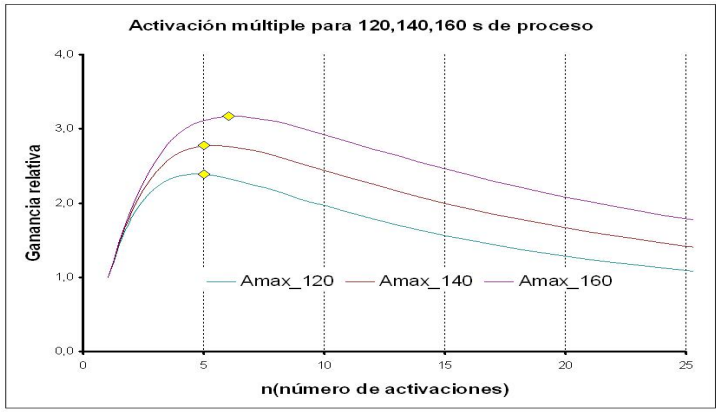
[4] El número de ciclos necesario para obtener un beneficio se incrementa al aumentar el tiempo de proceso.

Parece interesante ver con más detalle esta gráfica cuando el número de ciclos es pequeño, por lo que en las siguientes figuras se representa con detalle las curvas de la Figura 505 y Figura 506, en valores de activación bajos.



a





c

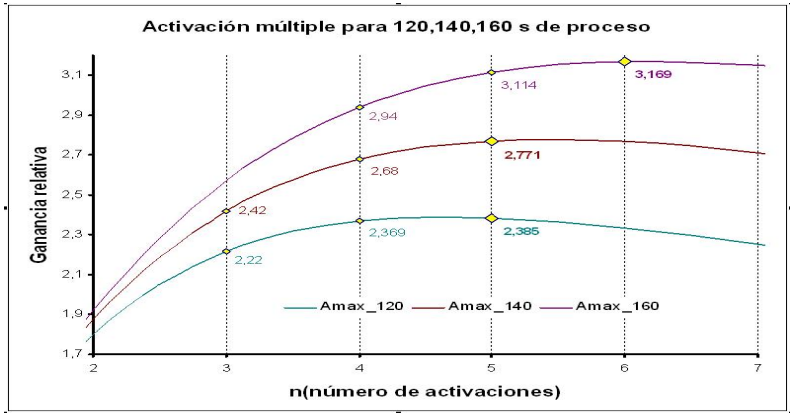
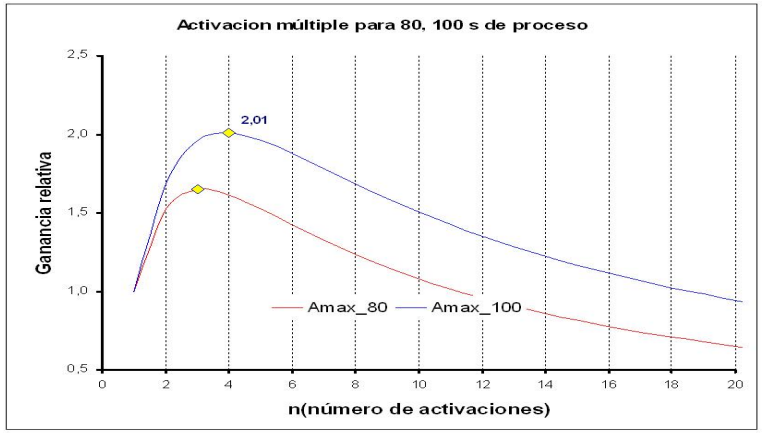
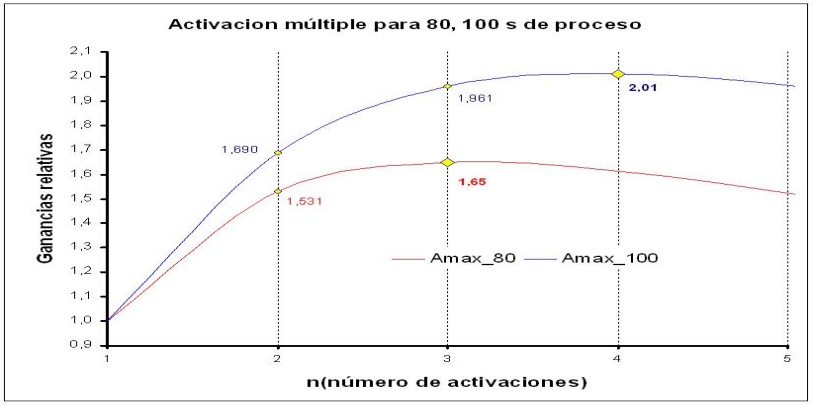
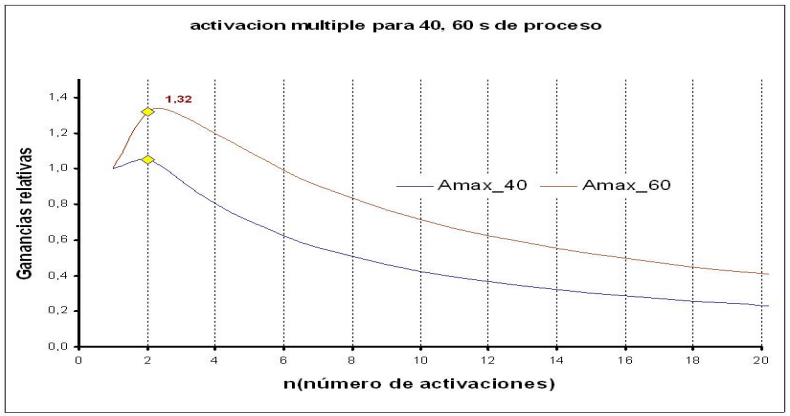


Figura 505. Representación en detalle de las curvas de la Figura 504.







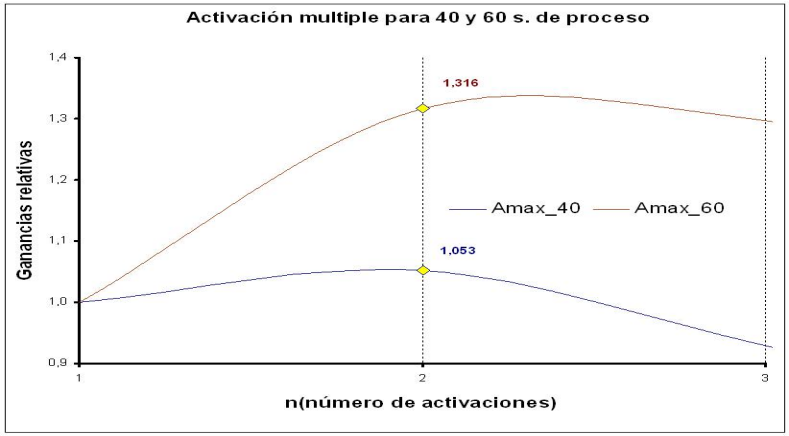


Figura 506. Representación en detalle de las curvas de la Figura 504.

En la Tabla 269 se resumen las ganancias relativas y el número de ciclos óptimo para cada tiempo de proceso, que es el mismo que se obtuvo en la Tabla 268.

Tiempo de proceso	Ganancia relativa	Nº ciclos óptimo
300	5,936	12
240	4,749	9
200	3,9546	8
180	3,546	7
160	3,169	6
140	2,77	5
120	2,385	5
100	2,01	4
80	1,65	3
60	1,316	2
40	1,053	2

Tabla 269. Número de ciclo óptimo y ganancia relativa G en la señal detectada, para distintos tiempos de proceso.

En la Figura 507 se muestra una gráfica en la que se representa en el eje de abscisas el tiempo de proceso, y en el eje de ordenadas, los siguientes parámetros:

[1] Por una parte, el número de ciclos óptimo para cada tiempo de proceso, según la Tabla 270. Se observa que la correlación da una línea recta cuya ecuación y coeficiente de correlación aparece en la gráfica. Es decir, al aumentar el tiempo de proceso, aumenta linealmente el número de ciclos óptimo necesario para conseguir una señal máxima.

[2] el tiempo de activación de cada ciclo óptimo, que proviene de la ecuación $\tau=T/2n$, y que vemos que tiende a un valor constante e igual a 13 s.

Se deduce, en consecuencia, que para los tiempos de proceso puntuales analizados, existe un número de ciclos, para el cual se da una ganancia máxima de señal respecto a la señal obtenida si no se hiciera más que un solo ciclo de activación lectura.

Tiempo de proceso T	Nº de ciclos óptimo	$\tau=T/2n$
40	2	10,0
60	2	15,0
80	3	13,3
100	4	12,5
120	5	12,0
140	5	14,0
160	6	13,3
180	7	12,9
200	8	12,5
240	9	13,3
300	12	12,5

Tabla 270. Número de ciclos y tiempos de activación óptimo para varios tiempos de proceso.

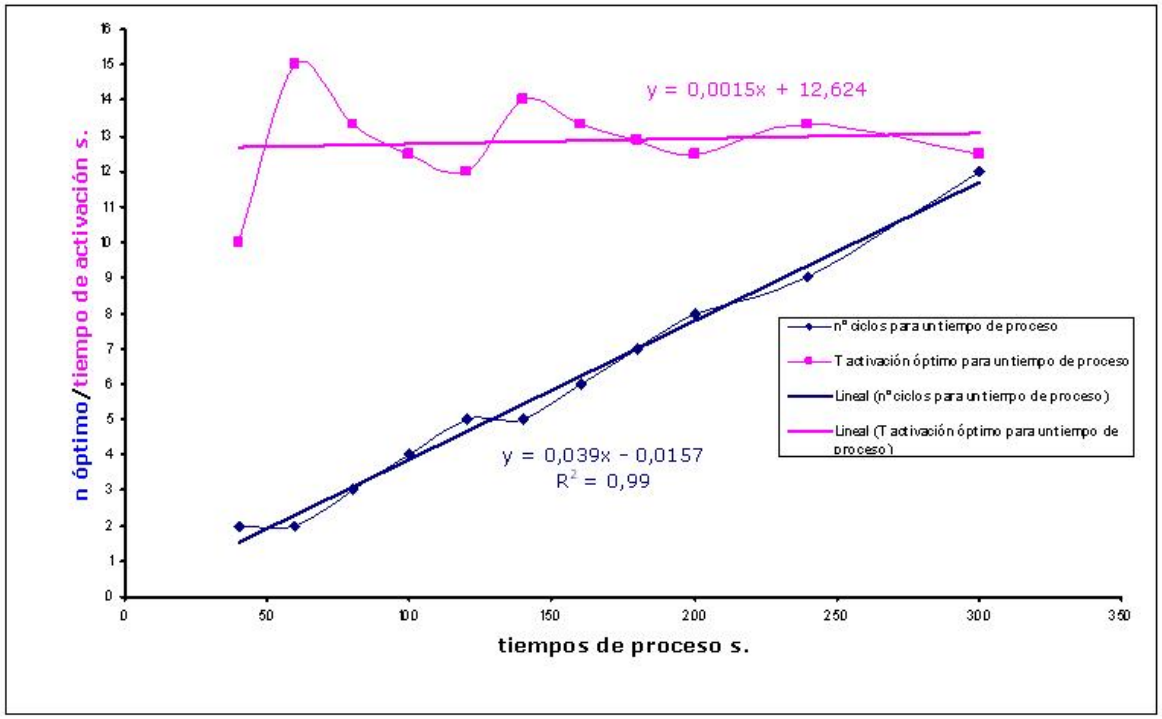


Figura 507. Representación conjunta de a) número de ciclos óptimo y b) tiempo de activación, para distintos tiempos de proceso.

8.4.2. Determinación del número de ciclos óptimo para un tiempo de proceso determinado.

La forma matemática de deducir el número de ciclos óptimo para cualquier tiempo de proceso se obtiene a partir de la ecuación [31], derivando respecto a *n* e igualando a cero, con la peculiaridad de que *n* debe ser un número natural,

$$A_{\max}^{nciclos} = \frac{nK}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2$$

Su derivada respecto a n es:

$$\frac{dA_{\max}^{nciclos}}{dn} = \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2 + \frac{K}{\lambda}n\frac{d}{dn}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2 \qquad [34]$$

y como,

$$\frac{d}{dn}\left(\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2\right) = \frac{d}{dn}\left(1+e^{-\lambda T/n}-2e^{-\lambda T/2n}\right) = -\lambda T\left(\frac{-1}{n^2}\right)e^{-\lambda T/n} - 2\left(\frac{-\lambda T}{2}\right)\left(\frac{-1}{n^2}\right)e^{-\lambda T/2n}$$

es decir,

$$= \frac{\lambda T}{n^2}e^{-\lambda T/n} - \frac{\lambda T}{n^2}e^{-\lambda T/2n} = \frac{\lambda T}{n^2}\left(e^{-\lambda T/n}-e^{-\lambda T/2n}\right) = \frac{\lambda T}{n^2}e^{-\lambda T/2n}\left(e^{-\lambda T/2n}-1\right)$$

sustituyendo en la ecuación [34] e igualando a cero, se llega a:

$$\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2+n\frac{K}{\lambda}\left\{\frac{-\lambda T}{n^2}e^{-\lambda T/2n}\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)\right\}=0$$

Que nos lleva a la ecuación:

$$\left(1-e^{-\lambda T/2n_{op}}\right)^2+\frac{-\lambda T}{n_{op}}e^{-\lambda T/2n_{op}}\left(1-e^{-\lambda T/2n_{op}}\right)=0$$

$$n_{op}\left(1-e^{-\lambda T/2n_{op}}\right)-\lambda Te^{-\lambda T/2n_{op}}=0$$

Y, de aquí,

$$n_{op}-n_{op}e^{-\lambda T/2n_{op}}-\lambda Te^{-\lambda T/2n_{op}}=0$$

Es decir,

$$n_{op}-e^{-\lambda T/2n_{op}}\left(n_{op}+\lambda T\right)=0$$

Y finalmente, se obtiene la expresión que relaciona el número de ciclos óptimo n_{op} con el tiempo de proceso T.

$$e^{\lambda T/2n_{op}}=1+\frac{\lambda T}{n_{op}} \qquad \textbf{[35]}$$

Esta ecuación no tiene una resolución numérica. Se puede resolver gráficamente, representando, para cada valor de n_{op},

- por un lado la función $y=e^{\lambda T/2}$,
- por otro la función $y'=1+\lambda T$ y,
- buscando el punto de intersección de ambas funciones, ($y=y'$) y determinando el valor de T que le corresponde.

En las Figura 508 y Figura 509 se ha realizado este proceso para $n_{op}=1$, y para $n_{op}=2$.

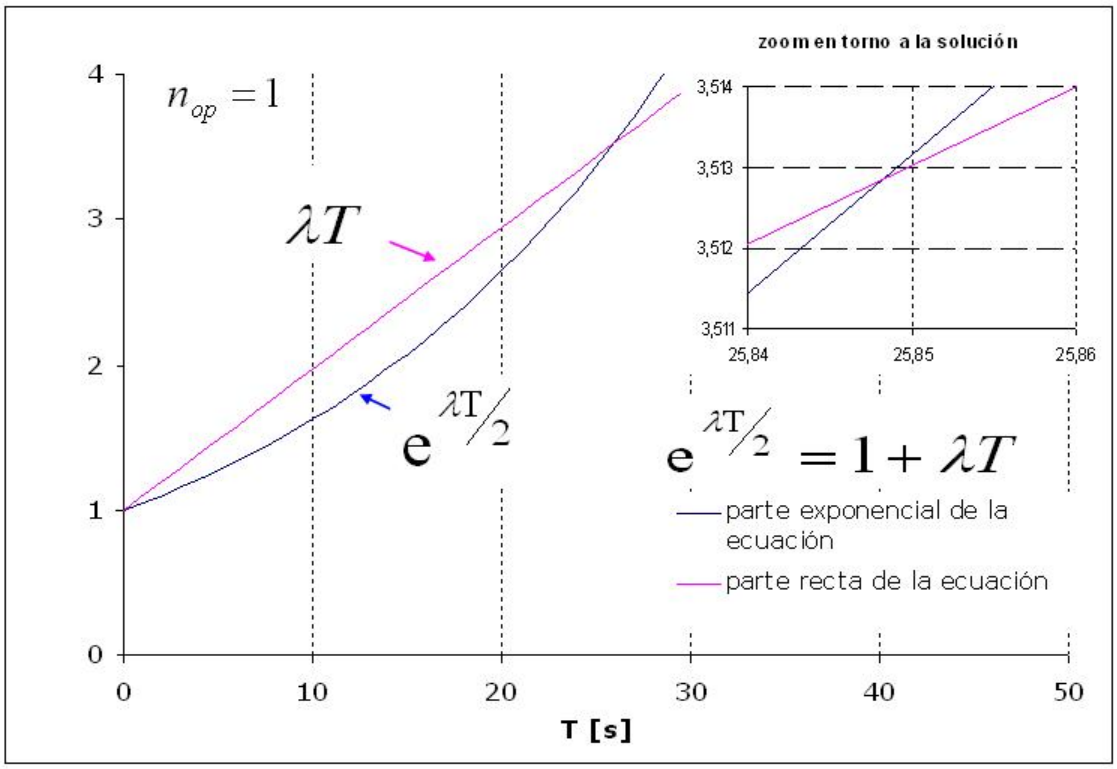


Figura 508. Resolución gráfica de la ecuación [35], para $n_{op} = 1$.

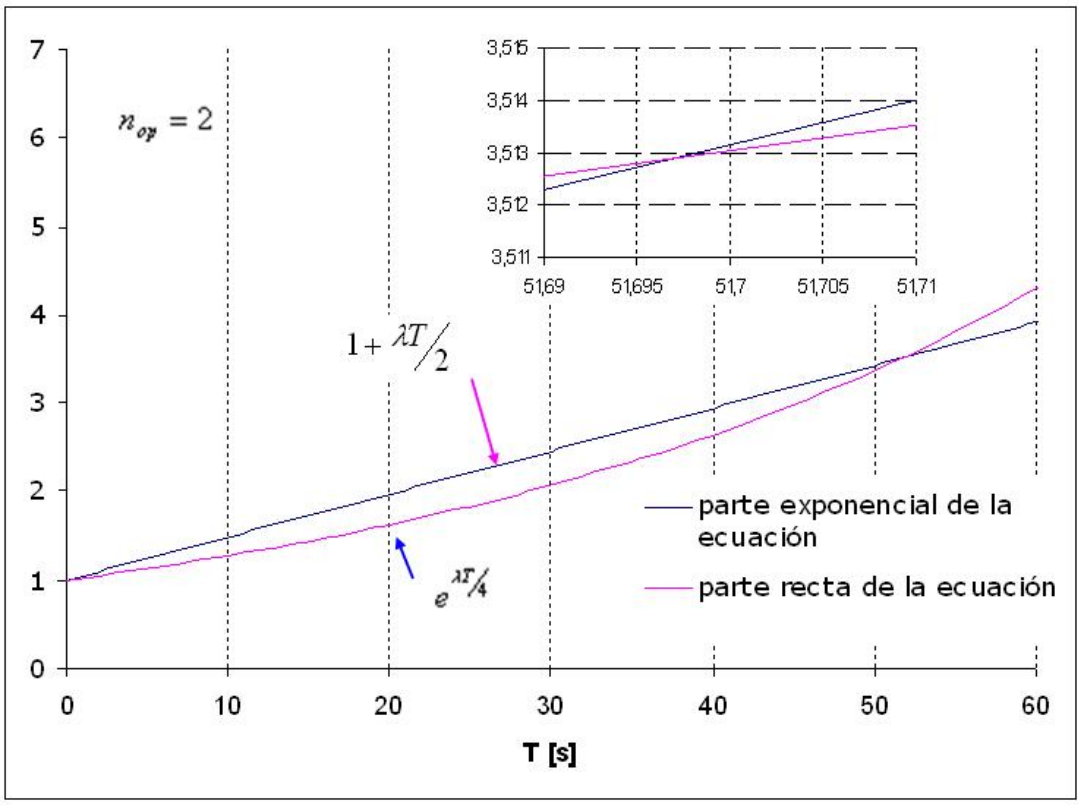


Figura 509. Resolución gráfica de la ecuación [35], para $n_{op} = 2$.

Las soluciones encontradas se reflejan en la siguiente tabla:

n_{op}	T	τ
1	entre 25,84 y 25,85 s	~ 12,92
2	en torno a 51,69 s	~25,84

Tabla 271. Valores de T para n igual a 1 y 2 a través de la resolución gráfica de la ec. [35] .

Con este método podemos determinar gráficamente T para cada valor de n_{op}. Pero si hacemos el cambio de variable:

$$a = 1 + \frac{\lambda T}{n_{op}}$$

la ec [35] quedaria de la siguiente manera:

$$\frac{\lambda T}{n_{op}} = a - 1$$

Con lo cual,

$$e^{a-1/2} = a \qquad [36]$$

y en consecuencia, la resolución se simplificaría pues esta ecuación tiene una solución única que se obtiene representando por separado la recta $y = a$, y la exponencial $y = e^{a-1/2}$ de la ec. [36] y buscando el punto de corte. En la Figura 510 se expresa en detalle esta zona de intersección.

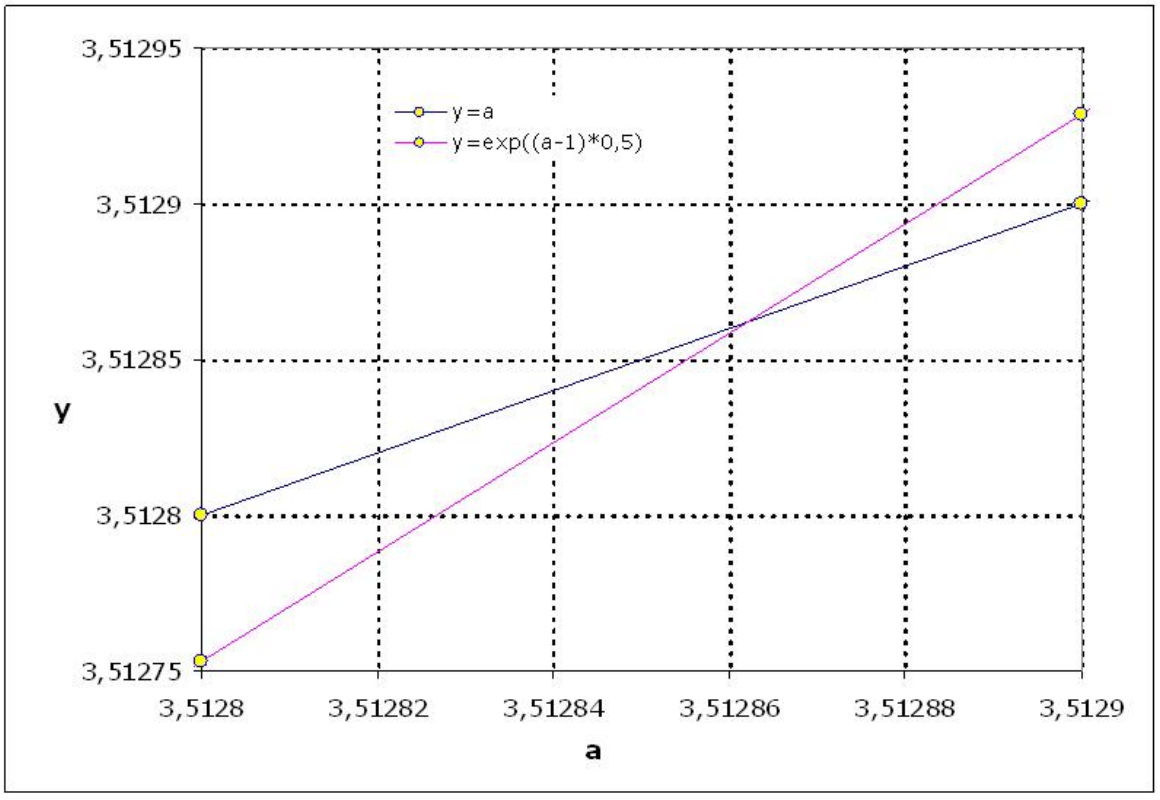


Figura 510. Resolución gráfica de la ecuación [36].

La solución es aproximadamente,

$$y = 3{,}51286$$

Por lo que,

$$1 + \frac{\lambda T}{n_{op}} = 3{,}51286$$

Y, por lo tanto, obtenemos la relación que permite obtener T para cada n_{op}.

$$T = \frac{2{,}51286}{\lambda} n_{op} \qquad [37]$$

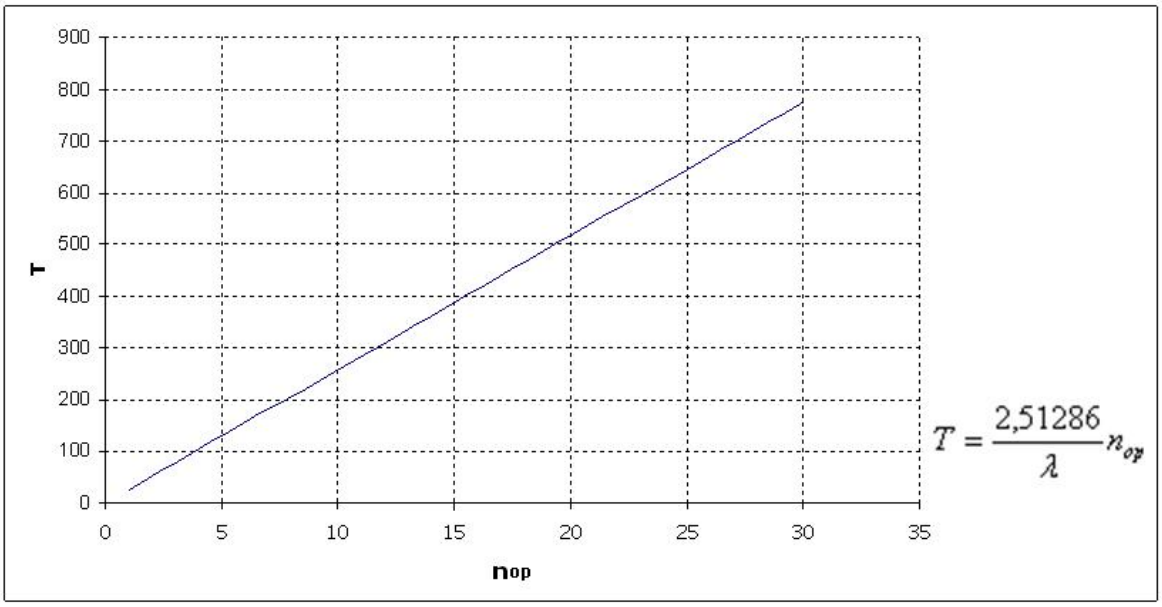


Figura 511. Gráfica que representa la ec. [37].

A partir de esta ecuación, se ha elaborado la Tabla 272, cuyos resultados son los mismos de la Tabla 270. (El tiempo de irradiación τ debe ser igual al tiempo de proceso T dividido entre $2n_{op}$).

n_{op}	T
1	25,84832241
2	51,69664482
3	77,54496723
4	103,3932896
5	129,241612
6	155,0899345
7	180,9382569
8	206,7865793
9	232,6349017
10	258,4832241
11	284,3315465
12	310,1798689
13	336,0281913

Tabla 272. Valores de tiempos de proceso T para n_{op} entre 1 y 13 ciclos, por medio de la ec. [37].

Si bien esta solución es totalmente válida, adolece del inconveniente de no indicar el número de ciclos cuando el tiempo de proceso está comprendido en un intervalo entre dos de los tiempos indicados anteriormente. Por ejemplo, si el tiempo de proceso se encuentra entre 25,84 s y 51,69, no indica el número de ciclos que deben llevarse a cabo para que la señal sea la óptima.

Para superar este inconveniente, se ha diseñado un procedimiento consistente en

a. representar gráficamente la ecuación $A_{\max}^{*nciclos} = n\left(1-e^{-\frac{\lambda T}{2n}}\right)^2 = A_{\max}^{nciclos}\frac{\lambda}{K}$ en función del tiempo de proceso para distintos valores de n.
b. Observar directamente la familia de curvas y, así,
c. deducir, para un T dado, el valor de n en el cual se encuentra un valor de $A_{\max}^{*nciclos}$ más elevado.

Esta ecuación se ha representado en la Figura 512 para valores de n comprendidos entre 1 y 14 ciclos.

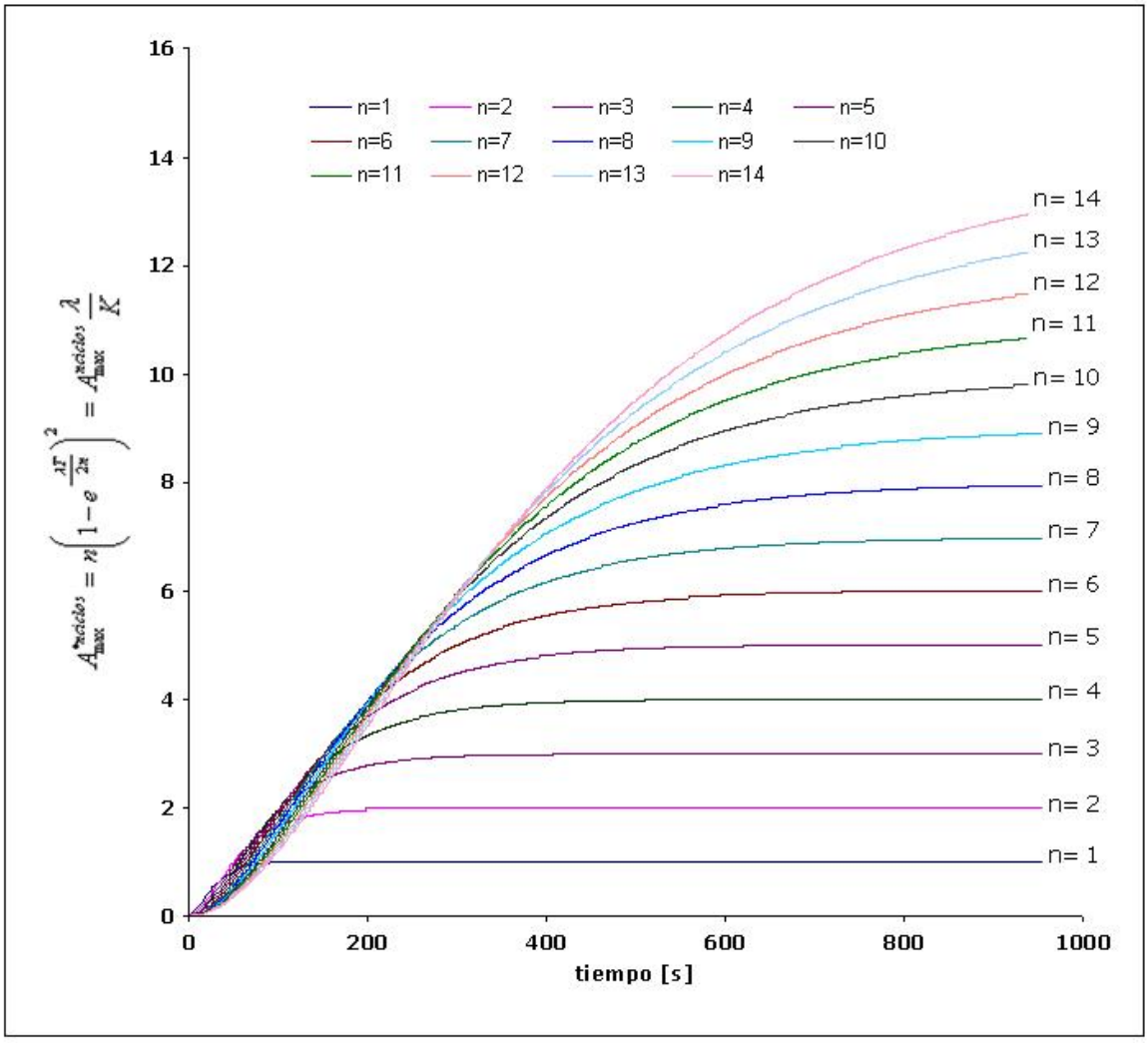


Figura 512. Representación de la función $A_{\max}^{*nciclos} = n\left(1-e^{-\frac{\lambda T}{2n}}\right)^2 = A_{\max}^{nciclos}\frac{\lambda}{K}$ versus tiempo de proceso T, para distintos valores de n.

Se observa que para valores bajos de T las curvas, que tienen individualmente forma creciente exponencial, se cruzan entre sí, mientras que en una segunda parte, las curvas son paralelas y asintóticas al valor máximo de la función $A_{\max}^{*nciclos}$ para cada valor de n. (Figura 513)

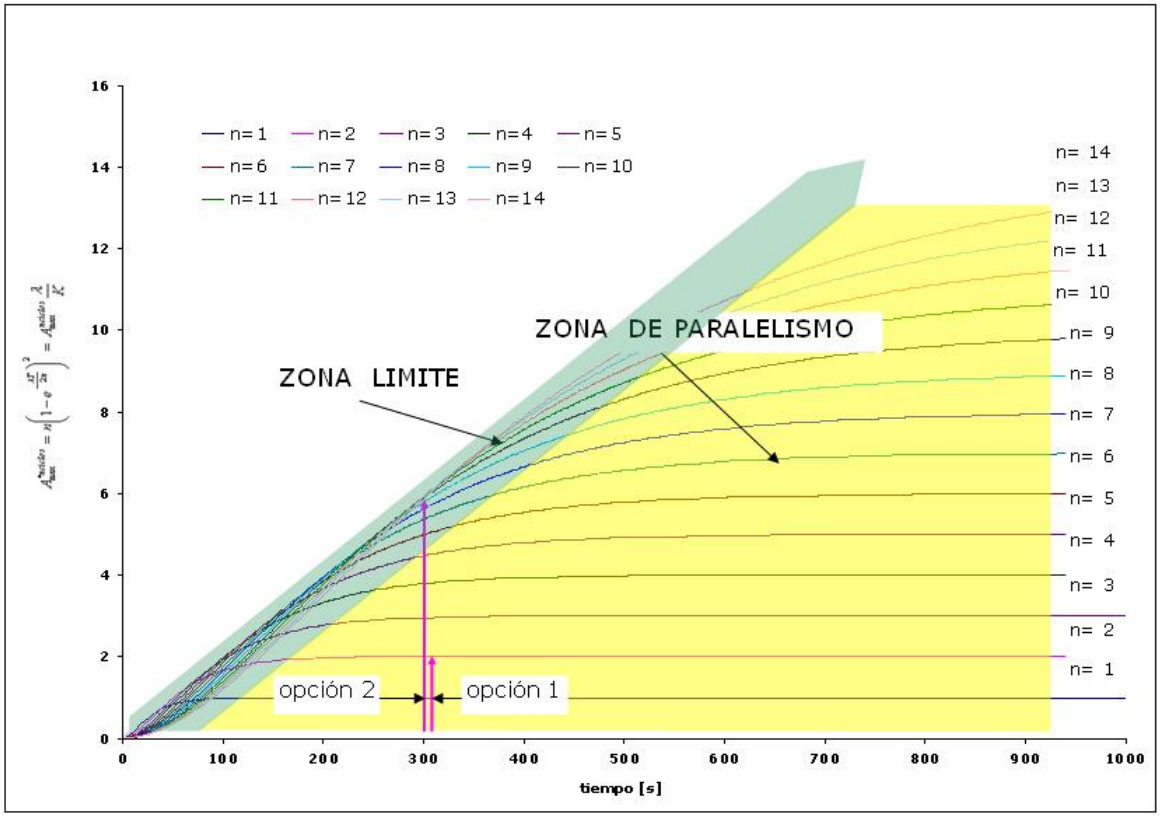


Figura 513. Zonas en la función $A_{\max}^{*nciclos}$.

Para un tiempo determinado T, el valor de la señal varía con el número de ciclos, hasta llegar a dos posibles zonas según la Figura 513, cuyo análisis es diferente:

a. Zona de paralelismo, (flecha opción 1): la familia de curvas están dispuestas paralelamente en esta zona. El valor de $A_{\max}^{*nciclos}$ es prácticamente su valor máximo para ese determinado número de ciclos. La única posibilidad para aumentar $A_{\max}^{*nciclos}$, es aumentar el número de ciclos. El hecho de aumentar el tiempo de proceso no supone ninguna mejora en la señal. Es decir, para una situación de trabajo en la que nos encontremos en la zona de paralelismo, siempre es posible mejorar la señal, aumentando el número de ciclos hasta situar el proceso en la zona límite.

b. Zona límite, (flecha opción 2): la familia de curvas se entrecruzan y se solapan en torno a una franja que llamamos zona límite. El trabajo en esta zona debe analizarse cuidadosamente pues se puede dar el caso de que al aumentar el número de ciclos disminuya $A_{\max}^{*nciclos}$. En el ejemplo de la Figura 514 se aprecia que para tiempos de proceso de 20 s. se obtiene más señal con un solo ciclo, que con tres ciclos, mientras, con tiempos de proceso de 50 s se obtiene más respuesta con dos ciclos que con tres o con uno.

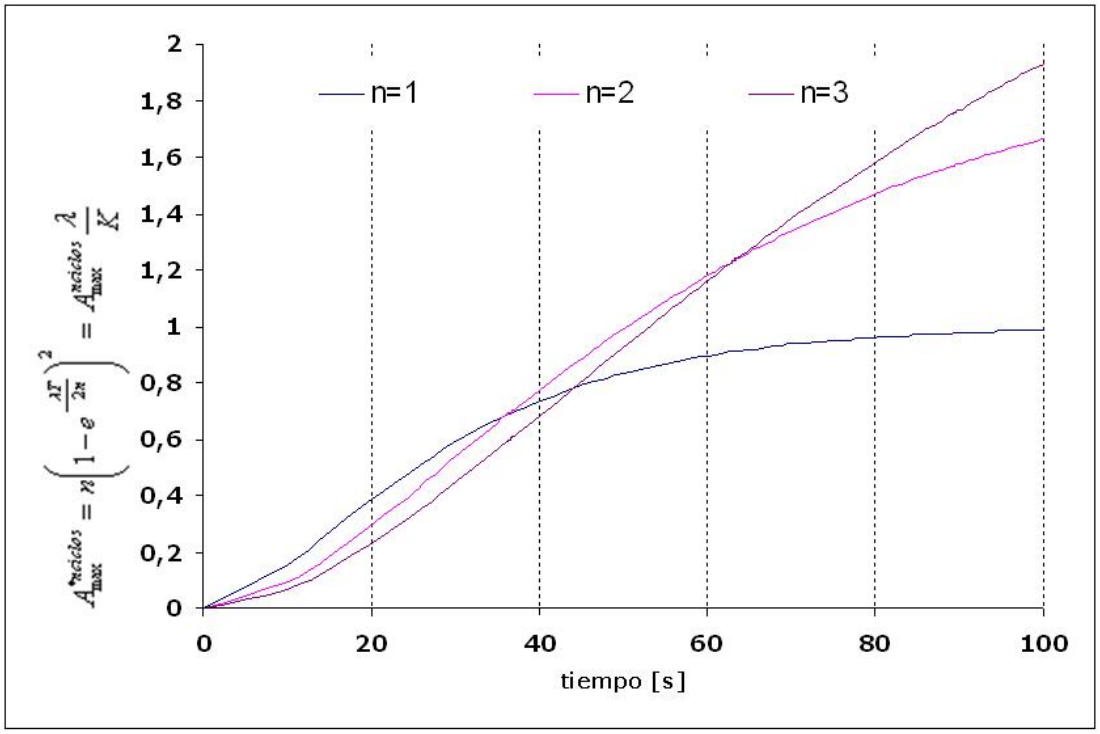


Figura 514. Familia de curvas correspondientes a n entre 1 y 3, en tiempos de proceso "bajos".

8.4.2.1. Análisis en la zona de paralelismo.

De la observación de las curvas se deduce que para un tiempo de proceso T y un número de ciclos n tal que la curva se encuentra en la parte asintótica, el hecho de aumentar el tiempo de proceso no lleva a mejorar la señal. Para conseguir este objetivo debemos aumentar el número de ciclos.

El valor máximo de $A_{\max}^{*nciclos}$ para cada n, es asintótico al valor que denominaremos $\left\langle A_{\max}^{*nciclos}\right\rangle_m$ y que se calcula como el límite de $A_{\max}^{*nciclos} = n\left(1-e^{-\frac{\lambda T}{2n}}\right)^2$ cuando T tiende infinito. Este límite converge a n, ya que, en la fórmula anterior, n es un número finito, y la exponencial tiende a cero cuando en su exponente "T" tiende a infinito.

$$\left\langle A_{\max}^{*nciclos}\right\rangle_m = \lim_{T\to\infty}\left[n\cdot\left(1-e^{-\lambda T/2n}\right)^2\right] = n \qquad [38]$$

Es decir, el valor de $\left\langle A_{\max}^{*nciclos}\right\rangle_m$ con 5 ciclos es 5, con 15 ciclos es 15, y así sucesivamente, y este valor se alcanza a partir de un determinado tiempo de proceso. Más allá de este tiempo resulta inútil aumentar el tiempo de proceso, pues no se conseguirá más señal. Si se desea más señal hay que recurrir a aumentar el número de ciclos.

Con un tiempo de proceso y un valor de n comprendidos en la zona amarilla, siempre se puede encontrar otro valor más alto de n hasta estar dentro de la zona límite con el que se obtiene una señal apreciablemente mayor. Por esta razón no es aconsejable trabajar en la zona de paralelismo.

En la Figura 515 se ha representado en amarillo la zona en que las curvas son paralelas, es decir, solo a partir de los valores de T que hacen que $A_{\max}^{*nciclos}$ alcance el 99% de su valor máximo, y en color rosa, la zona en que las curvas tienen ordenadas cuyo valor oscila entre el 90 y el 99% de su valor máximo.

Se han representado con pequeños círculos los puntos de las curvas que corresponden a una ordenada 90% y 99% del valor máximo que puede alcanzar. Posteriormente se han unido con líneas discontinuas.

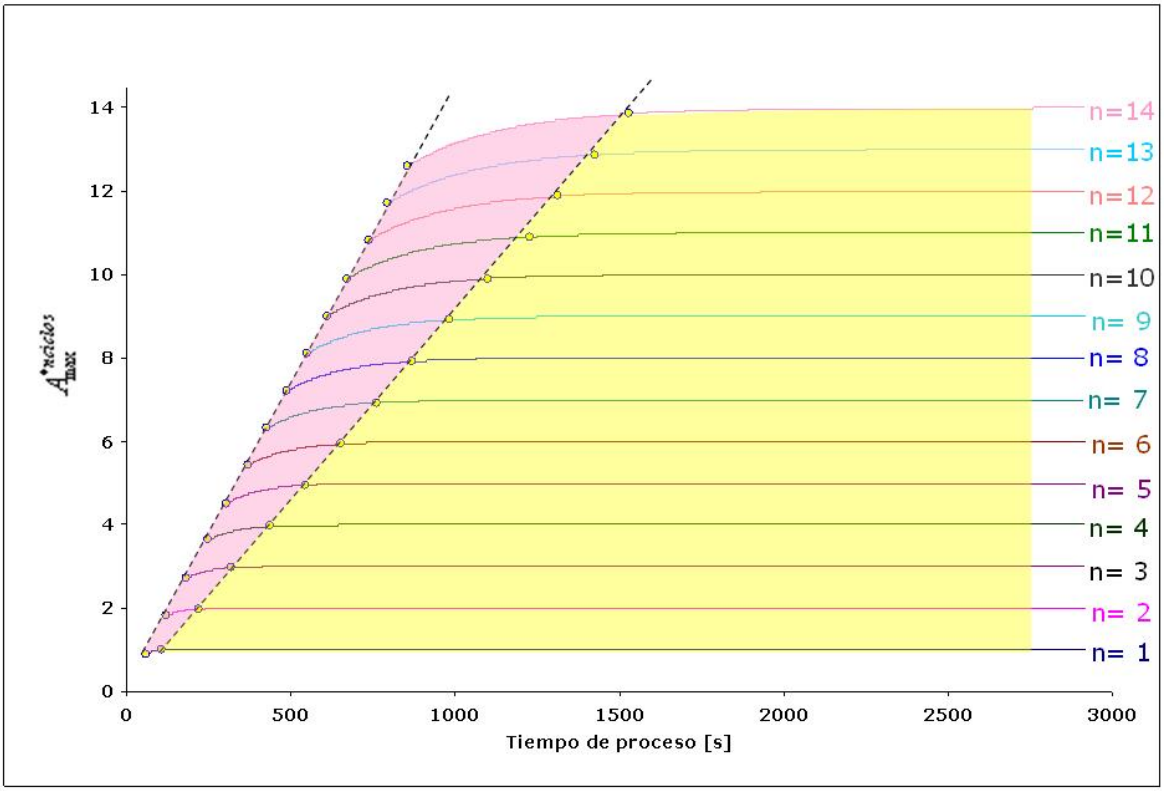


Figura 515. Zona de paralelismo de la Figura 512.

También se han representado en la Figura 516 y Figura 517 las mismas curvas en las que se ha superpuesto los valores de las coordenadas correspondientes a los puntos mencionados anteriormente (90-99% de $\left\langle A_{\max}^{*nciclos} \right\rangle_m$).

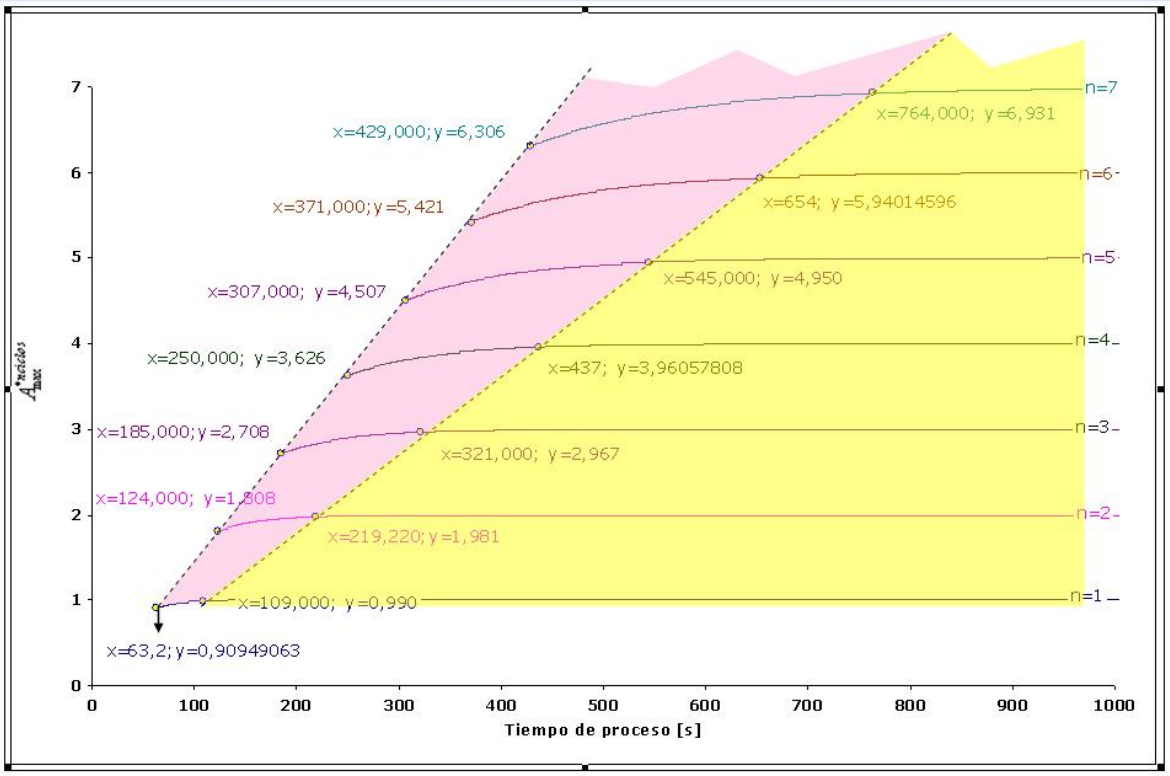


Figura 516. Zona de paralelismo de la Figura 512 con n entre 1 y 7, con las coordenadas de los puntos correspondientes a 0,9-0,99 $\left\langle A_{\max}^{*nciclos} \right\rangle_m$.

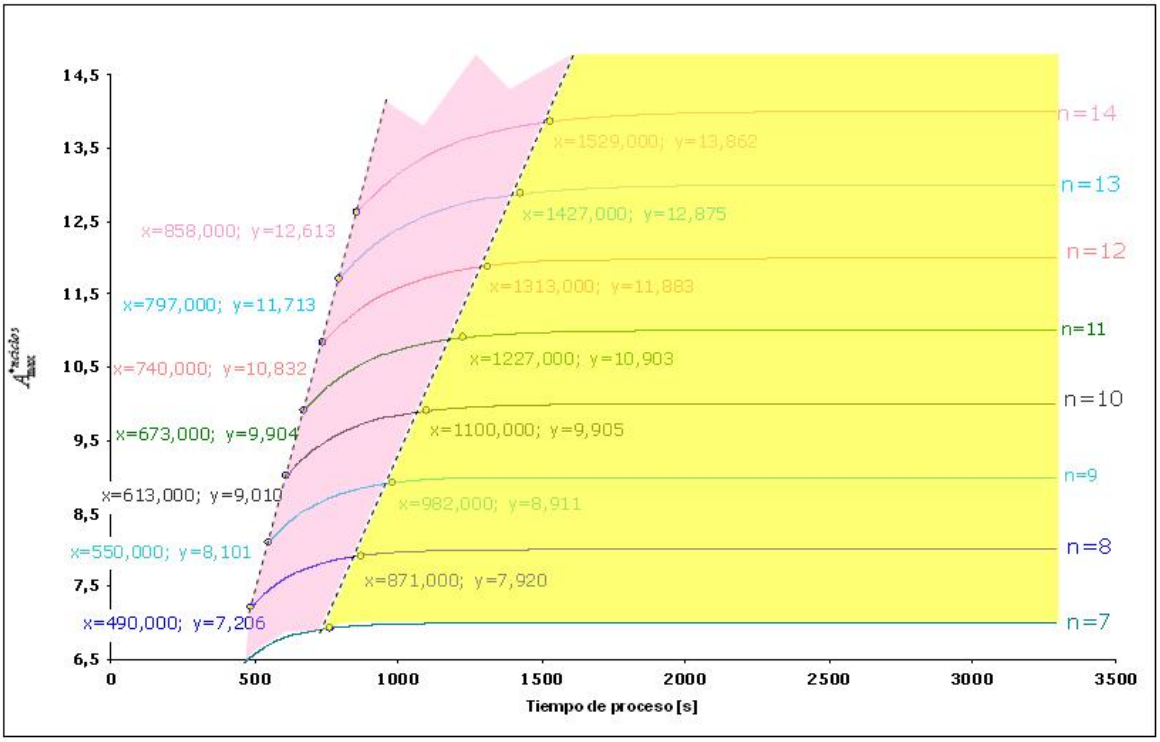


Figura 517. Zona de paralelismo de la Figura 512 con n entre 7 y 14, con las coordenadas de los puntos correspondientes a 0,9-0,99 $\left\langle A_{\max}^{*nciclos} \right\rangle_m$.

8.4.2.2. Análisis del número de ciclos en la zona límite.

La zona límite está caracterizada porque las curvas correspondientes a los distintos valores de n se cruzan entre sí en determinados puntos de intersección.

Si se recortan las curvas consecutivas en fragmentos comprendidos entre puntos de intersección obtenemos una curva única en la cual cada fragmento indica el número de ciclos en que el valor de la señal es el mayor para ese rango de tiempos. Para ilustrar este procedimiento se parte por ejemplo de la Figura 514 y se obtiene la Figura 518, en la que se puede ver por medio de zonas coloreadas, cómo se toman los fragmentos de las curvas.

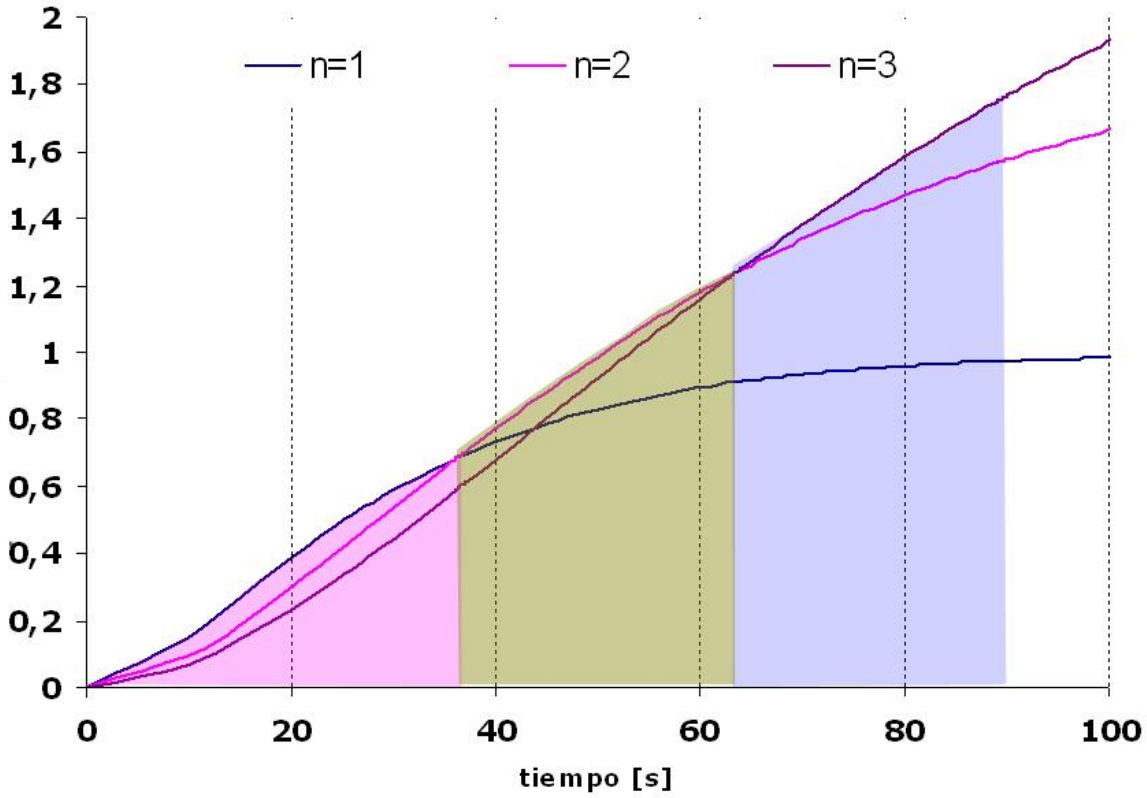


Figura 518. Fragmentos de las curvas entre los puntos de intersección. Eje ordenadas $A_{\max}^{*nciclos}$.

De esta forma, se ha elaborado la Figura 519 en la que sobre cada fragmento se ha escrito el número de ciclos con el que se corresponde la curva. Para una mayor claridad de la figura se ha recortado cada curva en la parte que queda por debajo de las otras curvas.

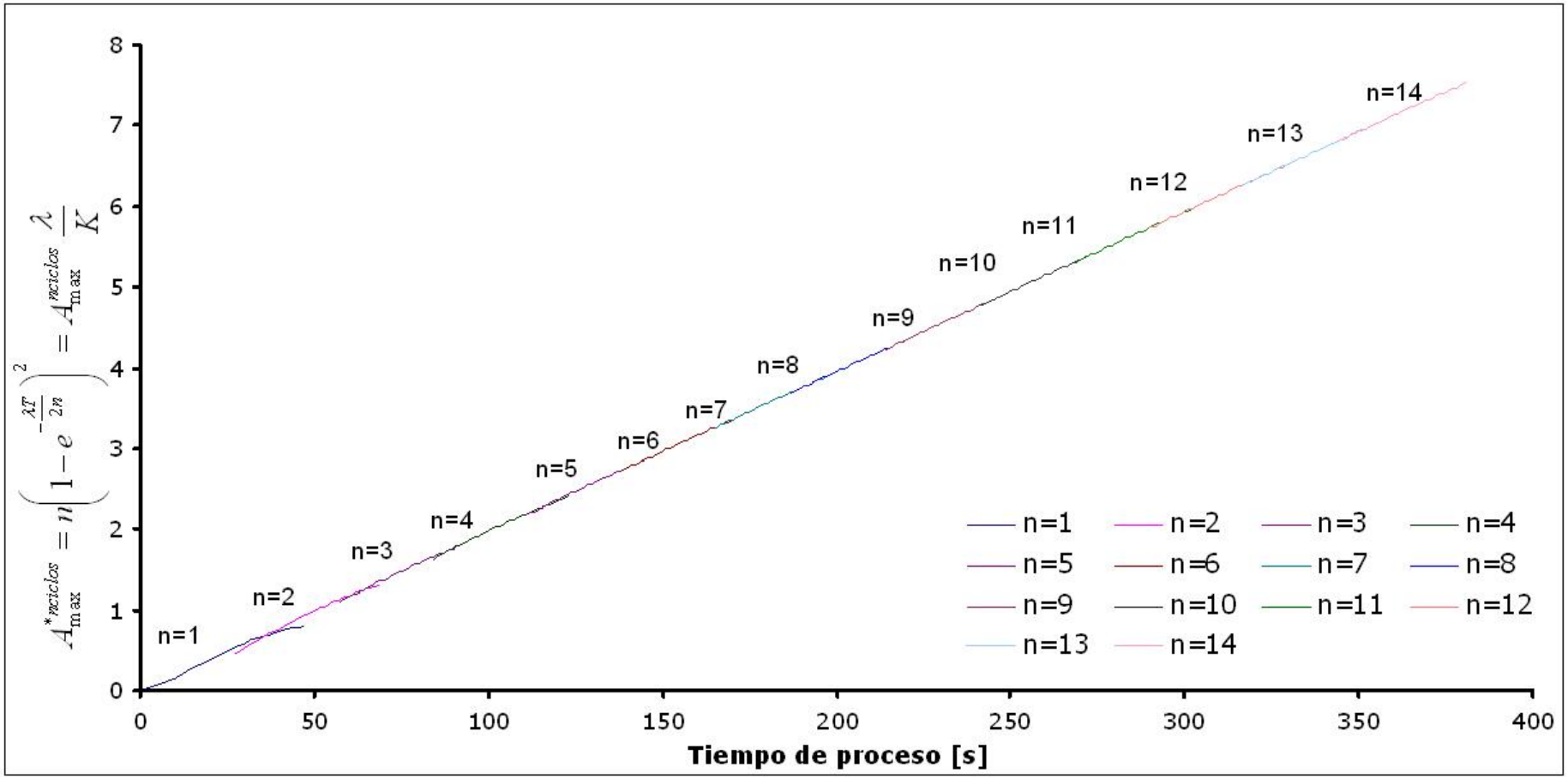


Figura 519. Recorte de los fragmentos de curva en la zona límite.

Como se ha indicado anteriormente, en la Figura 519 se han dibujado los tramos más superiores de cada curva en la zona límite. Esta gráfica se ha elaborado detalladamente, trazando tramos de curvas, para valores de n consecutivos desde $n=1$ a $n=14$. Estas curvas se solapan, y en la zona de solape, se observa cómo, en el punto de corte, la curva correspondiente a n ciclos pasa por encima de la curva anterior, correspondiente a n-1 ciclos.

Sin embargo, en estas zonas de solape donde se dibujan dos curvas, debido a la escala, en la Figura 519 apenas se aprecia contraste entre los valores de las curvas, tan solo, ligeramente, en las curvas correspondientes a los primeros valores de n. Por esta razón, se ha procedido a dibujar a mayor escala los tramos de solape de las curvas. En la Figura 520 a Figura 528 se representan de forma fácilmente visible, los tramos de solape, y se aprecia en los cuadros de detalle de la derecha, los puntos de corte con varios decimales.

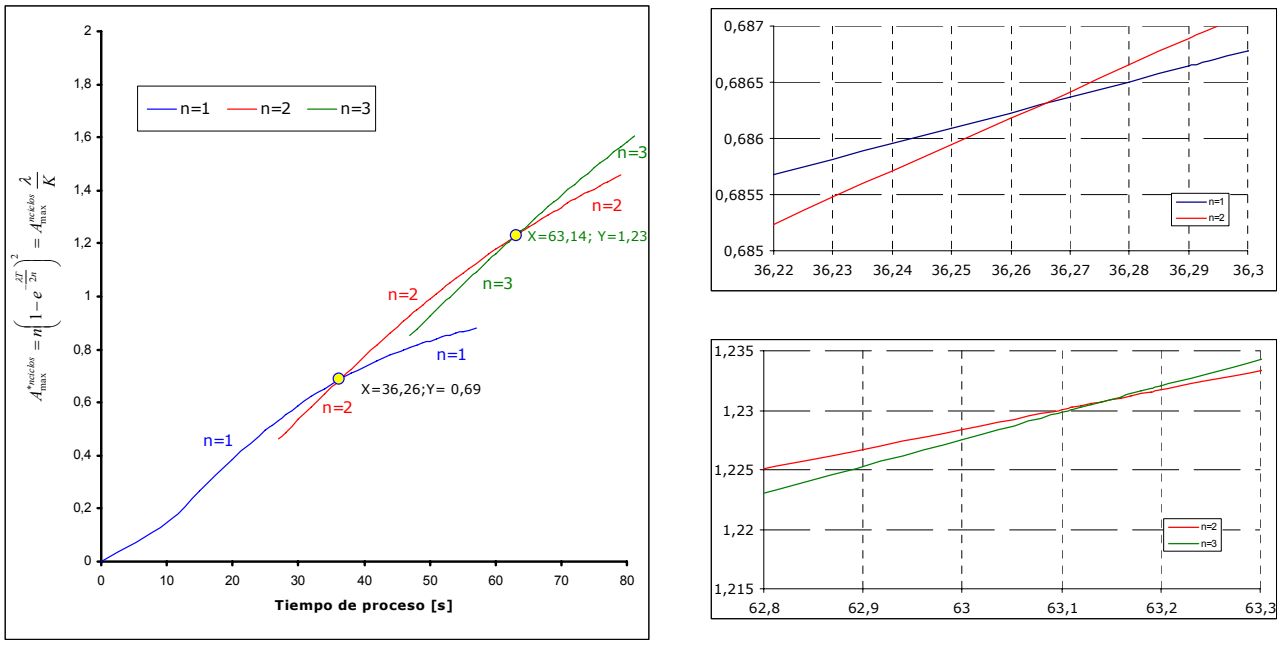


Figura 520. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso hasta 80 s.

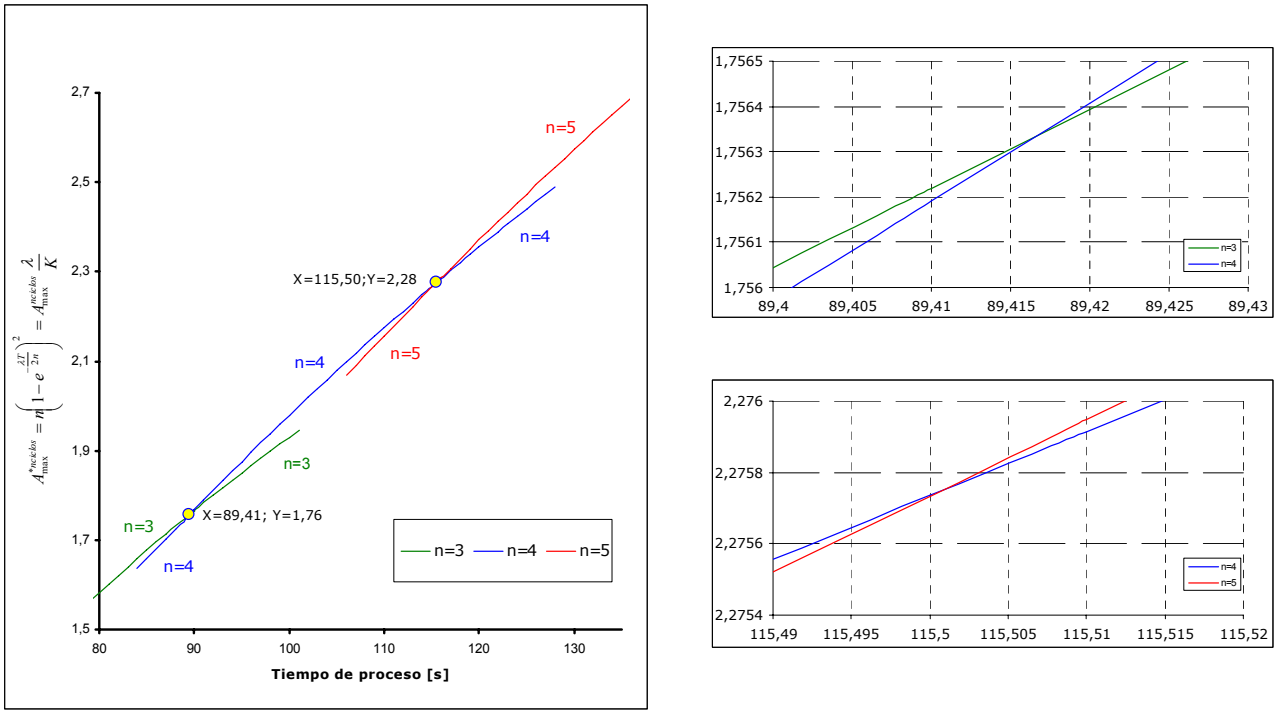


Figura 521. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 80 - 130 s..

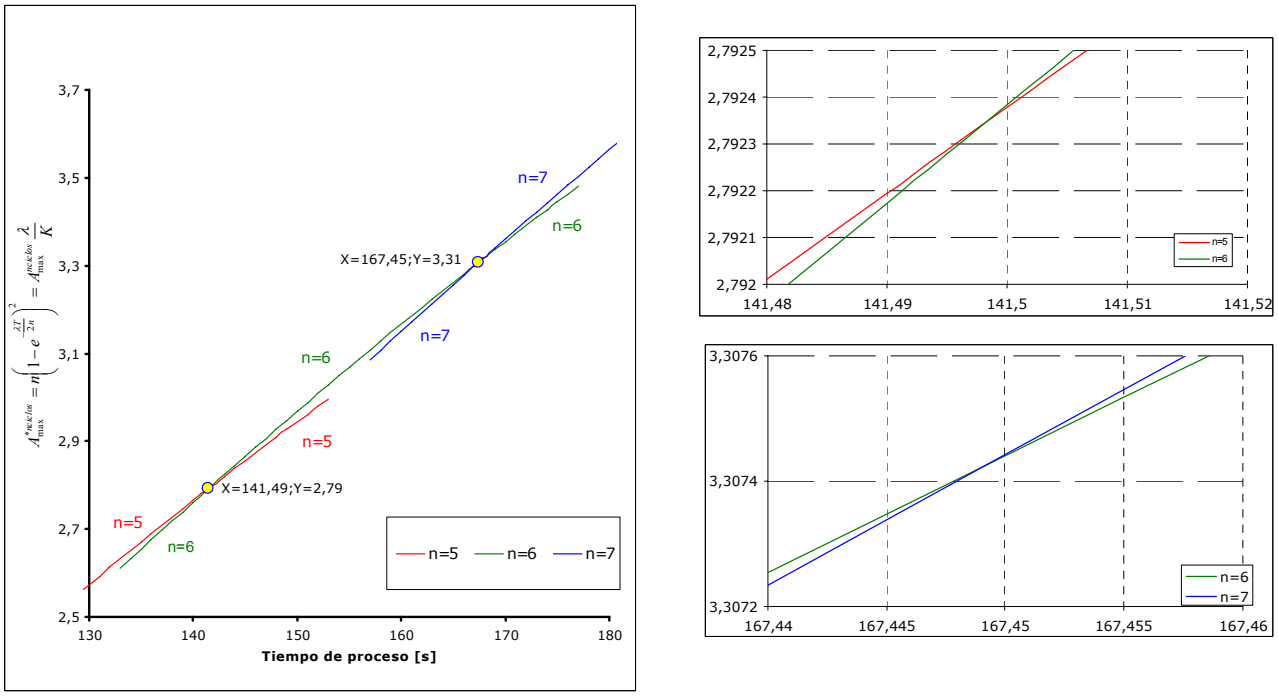


Figura 522. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 130 - 180 s..

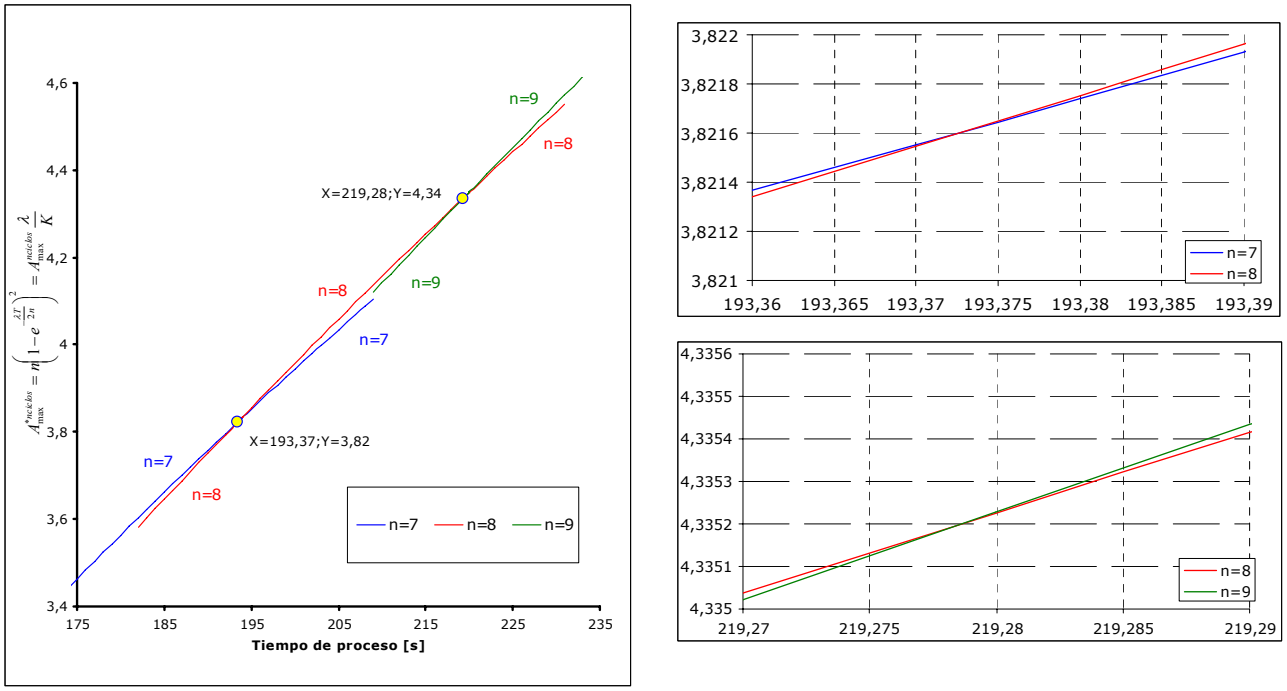


Figura 523. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 180 - 235 s..

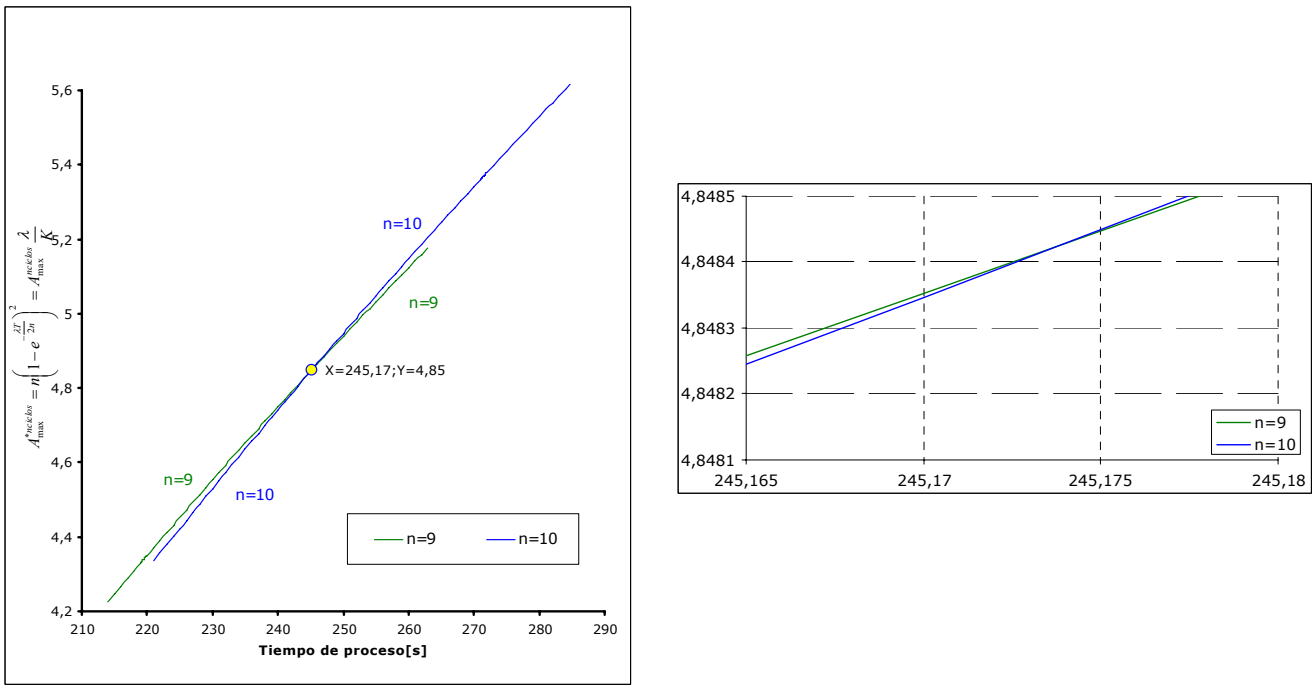


Figura 524. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 230 - 250 s.

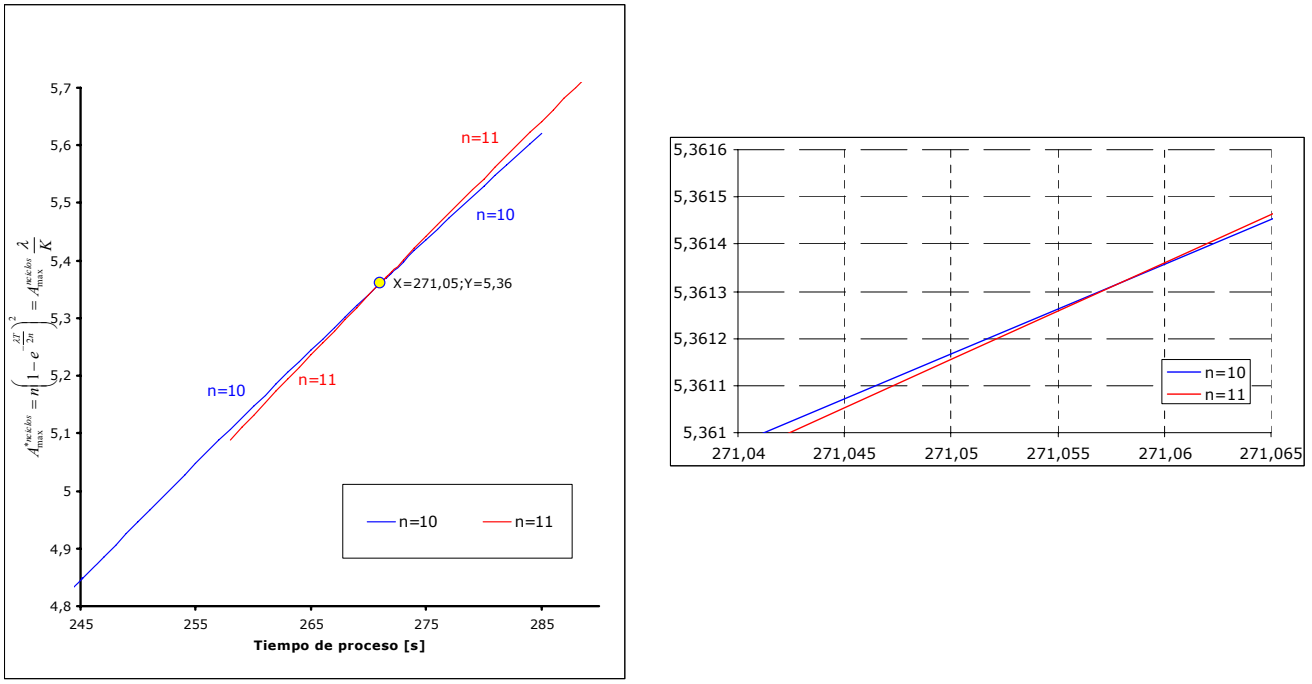


Figura 525. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 250 - 280 s..

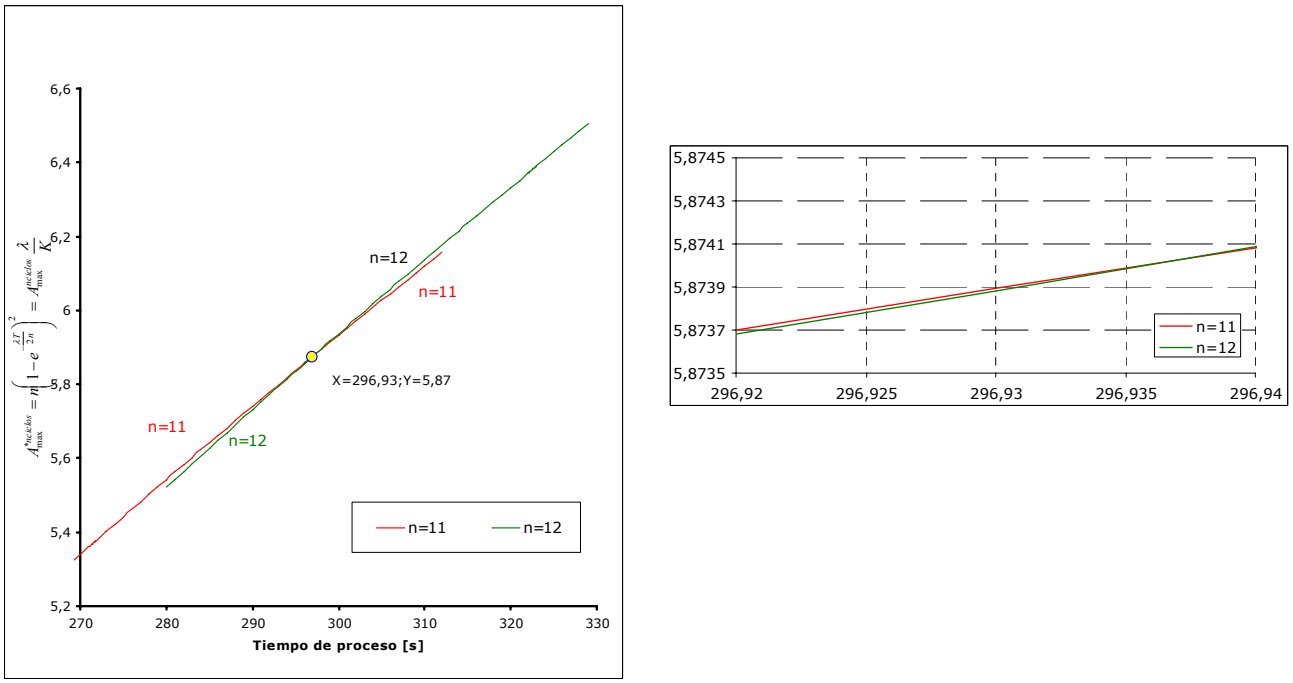


Figura 526. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 280 - 310 s..

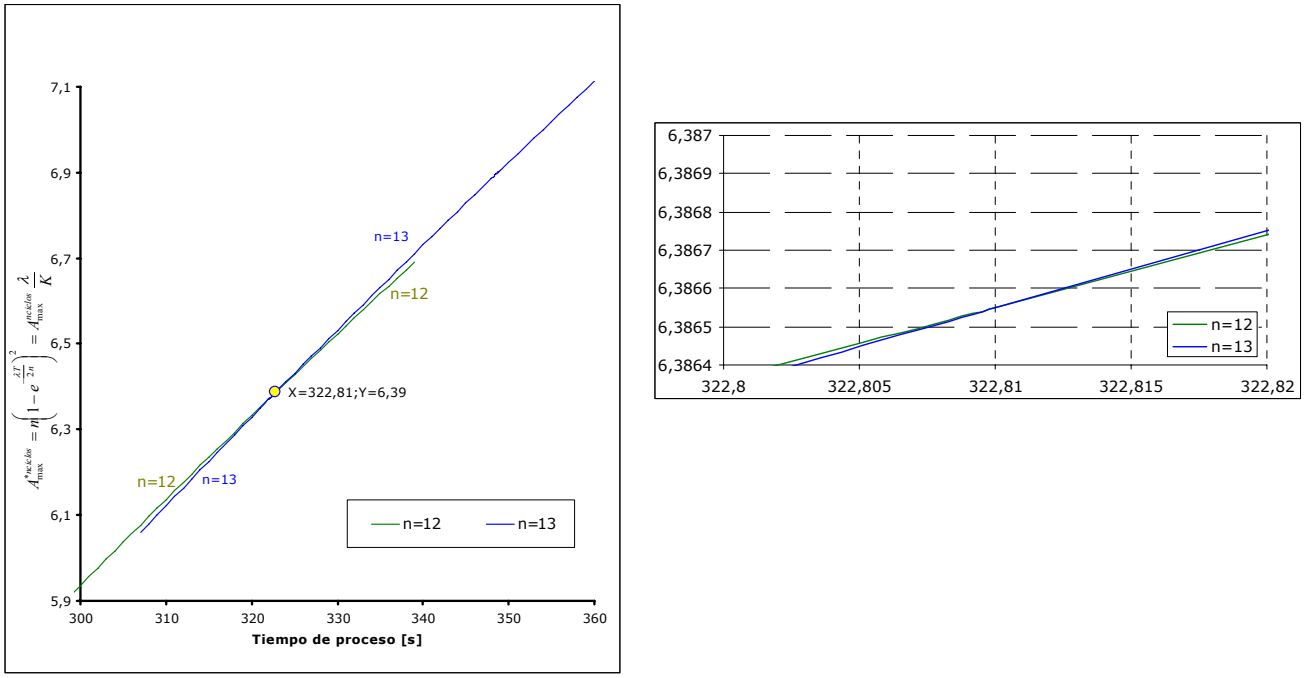


Figura 527. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 310 - 340 s..

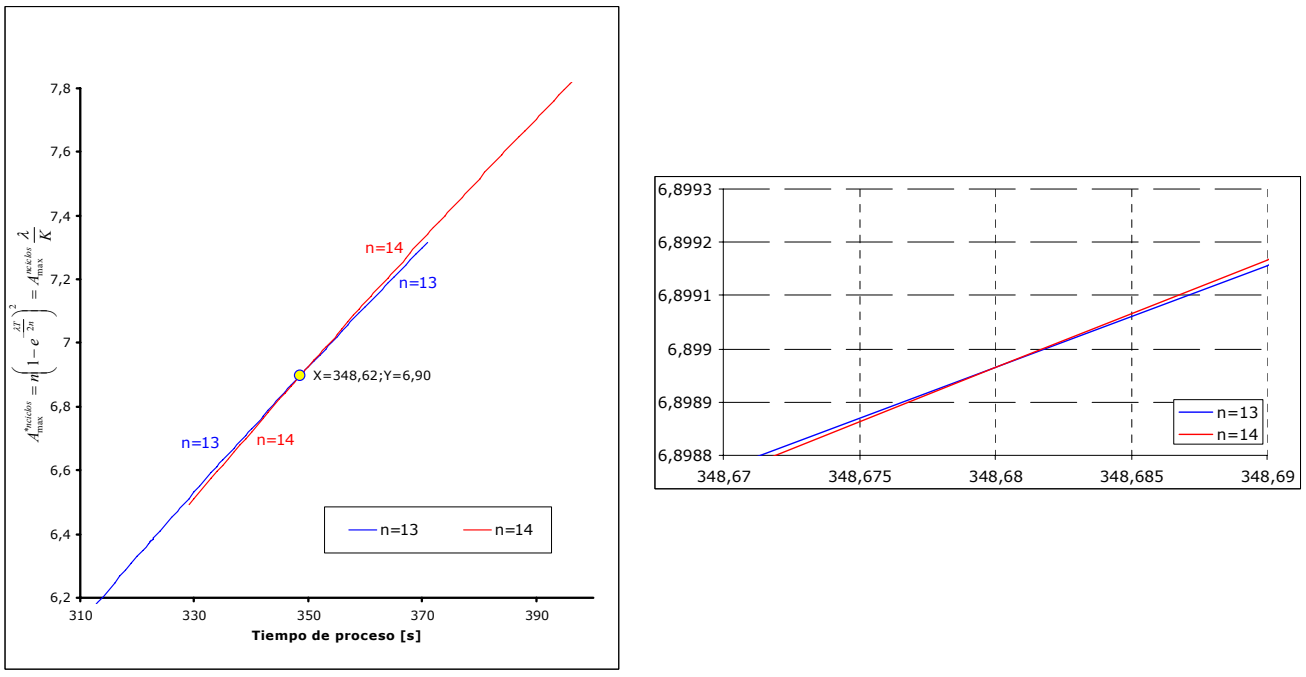


Figura 528. Representación detallada de las curvas en tiempos de proceso entre 340 – 370 s.

A partir de los datos extraídos de este conjunto de gráficas se ha elaborado la Figura 529, que representa los fragmentos de las curvas que están comprendidos entre dos puntos de corte. En dicha gráfica se muestran también las coordenadas de los puntos de corte.

Con esta curva, dado un tiempo de proceso determinado hasta casi 400 s., se puede establecer el número de ciclos con el cual la señal es máxima, y se puede determinar la ganancia de esta señal.

También se observa como, al aumentar el tiempo de proceso, las curvas en torno al punto de corte de dos valores consecutivos de n, y n-1, forman un ángulo cada vez menor, prácticamente se superponen, de donde se deduce que para valores elevados de n, no tiene demasiada trascendencia seleccionar n o n-1 ciclos en torno al valor de corte.

En resumen, la curva mostrada en la gráfica de la Figura 529 y que está formada por múltiples tramos, representa la función $A_{\max}^{*nciclos}$ frente al tiempo; esto quiere decir que, utilizando esta curva se extrae el valor exacto de $A_{\max}^{*nciclos}$ para cualquier tiempo comprendido entre 0 [s] y 360 [s] (6 minutos), y, a su vez, se deduce el número de ciclos óptimo con el que se debe realizar la medida.

Se concluye, a la vista de la gráfica, que si se ejecuta un tiempo de proceso con un número de ciclos determinado según la figura, y se desea aumentar la señal, será necesario recurrir a un tiempo de proceso mayor. Con esto, es posible que se pase al siguiente fragmento, y sea necesario aumentar el número de ciclos. Se recuerda que, en todo caso, el tiempo de activación ha de ser igual a la mitad del tiempo de lectura, y que todo el procedimiento se ha desarrollado detalladamente en el intervalo de 0 a 6 minutos pues es este un tiempo que el sector industrial considera razonable para un análisis.

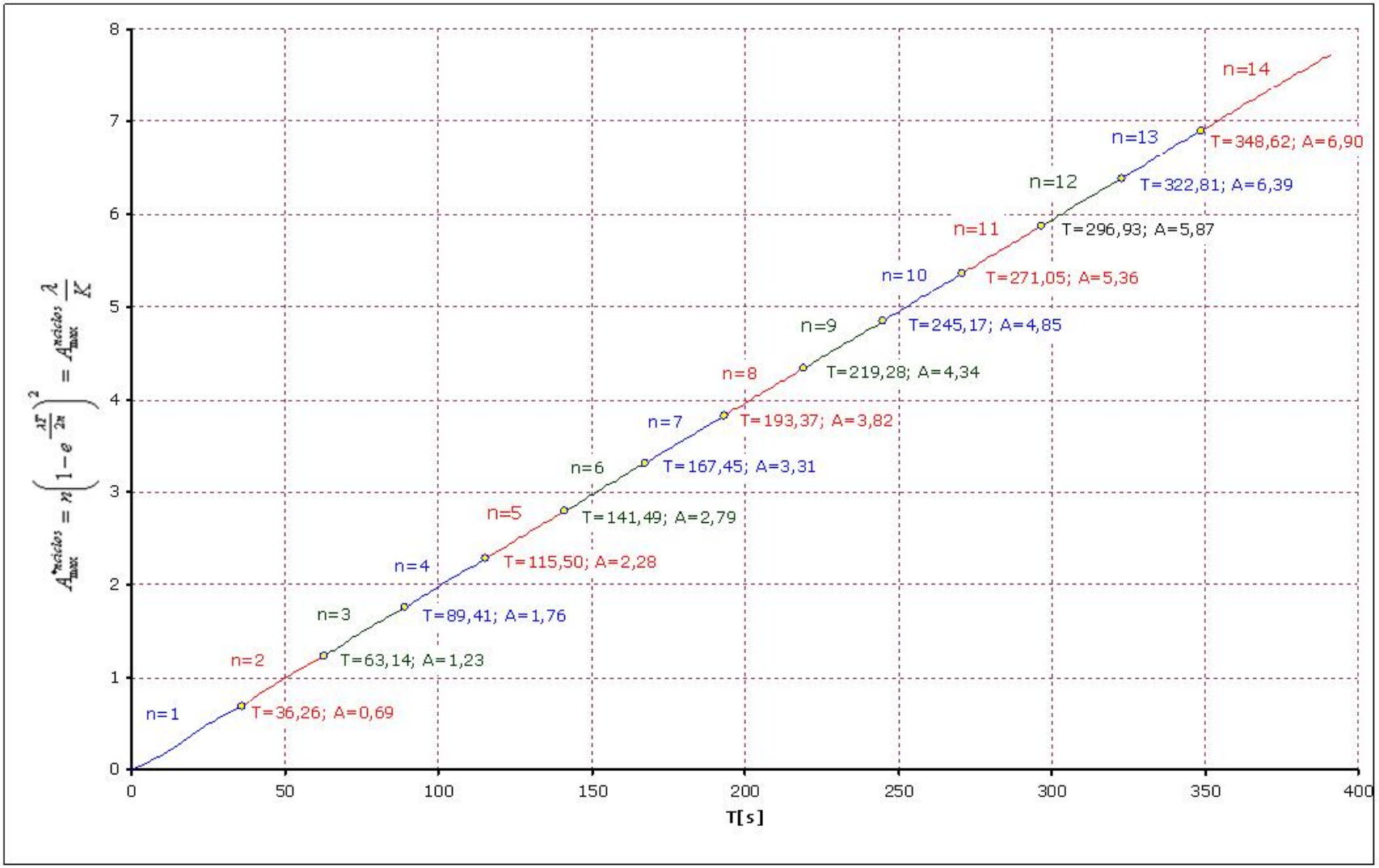


Figura 529. Curvas extremas de la zona límite indicando los puntos de corte de los fragmentos.

En la Tabla 273, se ofrecen los valores de la gráfica de forma numérica: en la primera columna se indica el número de tramo, en la segunda y la tercera el margen inferior y superior del intervalo de tiempo de proceso, y en la última el número de ciclos.

Nº de tramo	***Intervalo de tiempos de proceso T***		***Número de ciclos*** n_{op}
	entre	y	
1	0	36,26	1
2	36,26	63,14	2
3	63,14	89,41	3
4	89,41	115,50	4
5	115,50	141,49	5
6	141,49	167,45	6
7	167,45	193,37	7
8	193,37	219,28	8
9	219,28	245,17	9
10	245,17	271,05	10
11	271,05	296,93	11
12	296,93	322,81	12
13	322,81	348,62	13
14	348,62	360 o más	14 o más

Tabla 273. Número de ciclos para distintos tiempos de proceso por el método de los puntos de corte en la zona límite.

Si dibujamos una gráfica A-T y representamos las coordenadas de los puntos de corte, se observa que la línea de tendencia es una recta cuya ecuación es la siguiente:

$$A_{\max}^{*nciclos} = 0{,}0199T - 0{,}0221 \qquad \textbf{[39]}$$

Y cuyo coeficiente de correlación es 1.

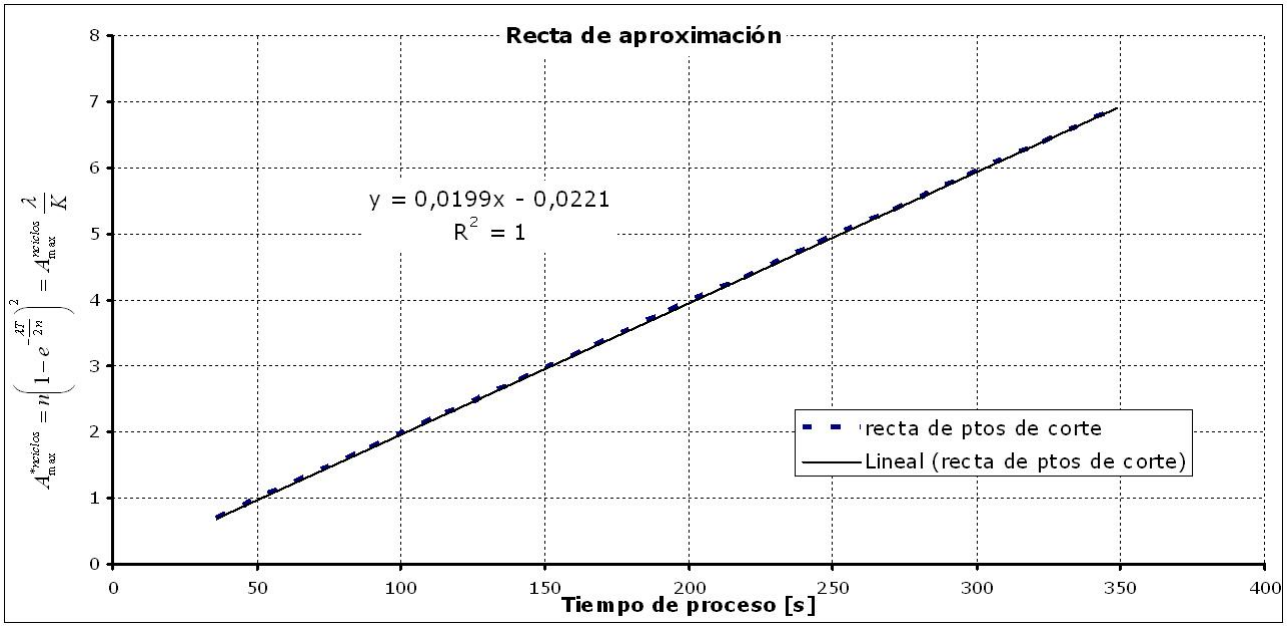


Figura 530. Recta de aproximación a los puntos de corte de la familia de curvas $A_{\max}^{*nciclos}$ para distintos valores de n.

Por otra parte, si representamos el número de ciclos de la Figura 530 en una gráfica $n_{op} - T$ obtenemos la Figura 531 en la que se aprecian:

- En color rojo oscuro, la línea en forma de escalera que representa los ciclos óptimos para cada tramo de tiempo de proceso según lo concluido en la Figura 529 y en la Tabla 273. Número de ciclos para distintos tiempos de proceso por el método de los puntos de corte en la zona límite. Se indica con el mismo color el extremo superior de cada tramo.
- En color azul, en trazo discontinuo una línea que representa la ecuación [37] y con puntos azules los correspondientes a los valores de tiempos de proceso que se corresponden con valores enteros de n, según figuran en la Tabla 272. Estos puntos se sitúan congruentemente con lo anterior, en un punto intermedio de cada tramo de la línea en forma de escalera.

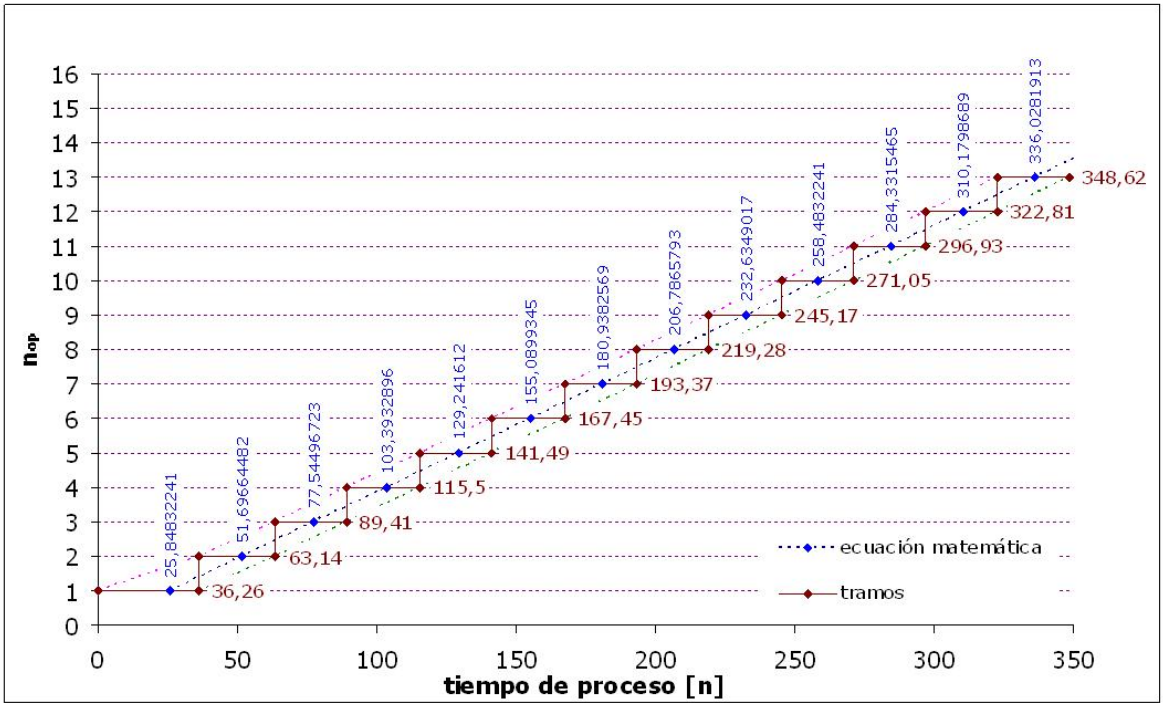


Figura 531. Representación conjunta de la ec [37] (ecuación matemática), y de los tramos según la Tabla 273.

En la Tabla 274 se expresan los resultados anteriores con objetivo de determinar el tiempo de cada ciclo (T/n) y tiempo de activación τ según el método matemático (ec [37]) y según el método gráfico relativo a la zona límite tal como se ha descrito anteriormente.

	método gráfico Figura 530			***método ecuación*** $T=\frac{2,51286}{\lambda}n_{op}$			***Diferencia expresada en %*** $100*\left(\tau_{graf}-\tau_{ec}\right)/\tau_{ec}$
n	T	T/n	τ_{graf}	T	T/n	τ_{ec}	
1	36,26	36,26	18,13	25,84	25,84	12,92	40,3
2	63,16	31,58	15,79	51,69	25,85	12,92	22,2
3	89,41	29,80	14,90	77,54	25,85	12,92	15,3
4	115,5	28,88	14,44	103,39	25,85	12,92	11,7
5	141,49	28,30	14,15	129,24	25,85	12,92	9,5
6	167,45	27,91	13,95	155,09	25,85	12,92	8,0
7	193,37	27,62	13,81	180,93	25,85	12,92	6,9
8	219,28	27,41	13,71	206,78	25,85	12,92	6,0
9	245,17	27,24	13,62	232,62	25,85	12,92	5,4
10	271,05	27,11	13,55	258,48	25,85	12,92	4,9
11	296,93	26,99	13,50	284,33	25,85	12,92	4,4
12	322,81	26,90	13,45	310,18	25,85	12,92	4,1
13	348,68	26,82	13,41	336,02	25,85	12,92	3,8

Tabla 274. Determinación del tiempo del ciclo.

De esta tabla, que se representa en la Figura 532 se deduce la importante conclusión de que cuando el número de ciclos es elevado, el tiempo de cada ciclo de activación tiende a 12,92 s., con un error en porcentaje que es insignificante para ciclos mayores de 13.

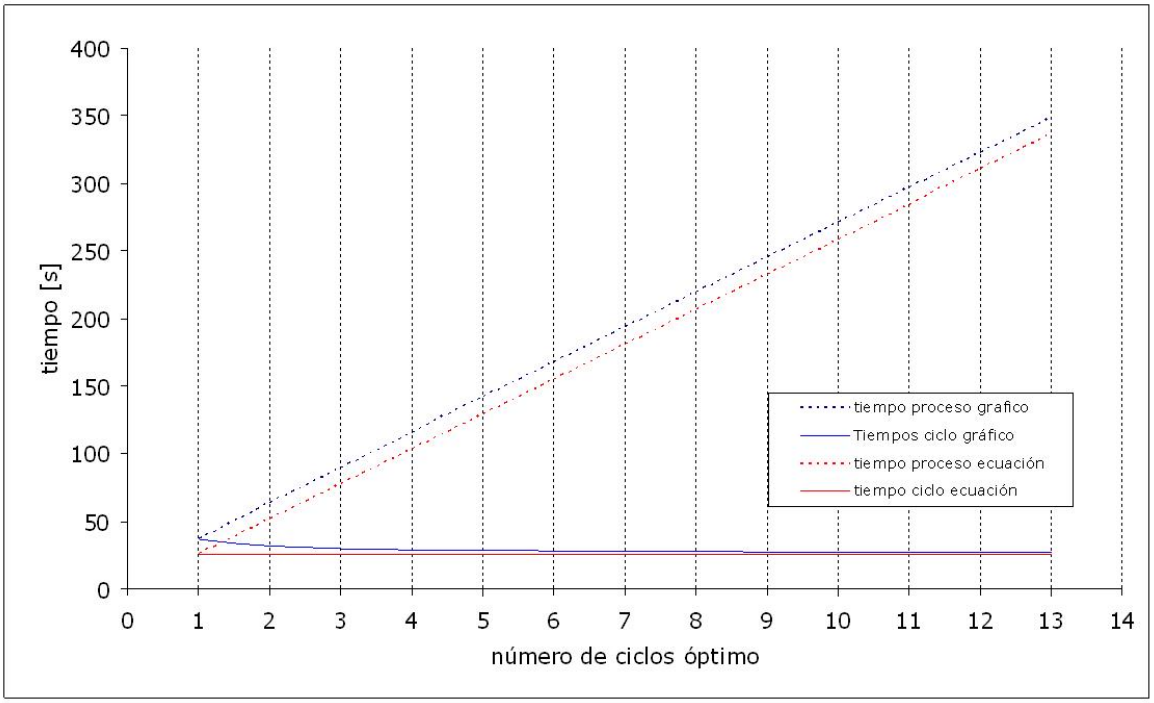


Figura 532. Estudio comparativo entre los dos métodos.

8.4.3. Conclusiones respecto al número óptimo de ciclos.

El hecho de que se realice un procedimiento con ciclos consecutivos de activación y lectura hace que se amplifique la señal que pasa a ser

- de (ec [26]):

$$A^{*}_{\max} = \left(1 - e^{-\lambda T/2}\right)^2$$

- a (ec.[32]):

$$A^{*nciclos} = n\left(1 - e^{-\lambda T/2n}\right)^2$$

Las expresiones elementales que nos permiten resolver cualquier problema son:

- la Figura 529 o la Figura 531 $T - n_{op}$ útil para tiempos de proceso menores de 300s.
- la ec [37] que también relaciona $T - n_{op}$

$$T = \frac{2{,}51286}{\lambda} n_{op}$$

útil para tiempos de proceso mayores de 300 s. y que se debe usar aproximando el número de ciclos a un número entero. Se ha visto que para esos valores de n_{op} no es

relevante tomar un valor de n_{op} o su inmediato. Esta ecuación supone tomar 25,8 s para cada ciclo de activación más lectura.

- la ec [39]

- $A_{\max}^{*nciclos} = 0{,}0199T - 0{,}0221$

Que es la recta equivalente a los tramos exteriores de la zona límite que representa a la familia de curvas de la ec. [32].

De esta forma se puede plantear cualquier tipo de problema:

[1] Supongamos que las señales máximas con una serie de muestras son demasiado bajas y que se quiere obtener una señal 10 veces superior, y se desea determinar el tiempo de proceso mínimo con el que se consigue dicha amplificación.

A través de la ec. [39] obtenemos el tiempo de proceso mínimo, que es:

$$T = \frac{10 + 0{,}0221}{0{,}0199}[s] = 503{,}6[s]$$

A través de la ec [37] tenemos que

$$n_{op} = T\frac{\lambda}{2{,}51586} = \frac{503{,}6[s]}{25{,}8[s/ciclo]} = 19{,}5 \ ciclos$$

La conclusión es que se pueden realizar 19 o 20 ciclos de 26 s cada ciclo, consistentes en 13 segundos de activación y 13 s. de lectura.

[2] Supongamos que se dispone de 250 s, y se desea conocer el grado de amplificación de la señal.

Según la Figura 529 el número de ciclos debe ser igual a 10 y la amplificación máxima con ese tiempo y número de ciclos es prácticamente 5.

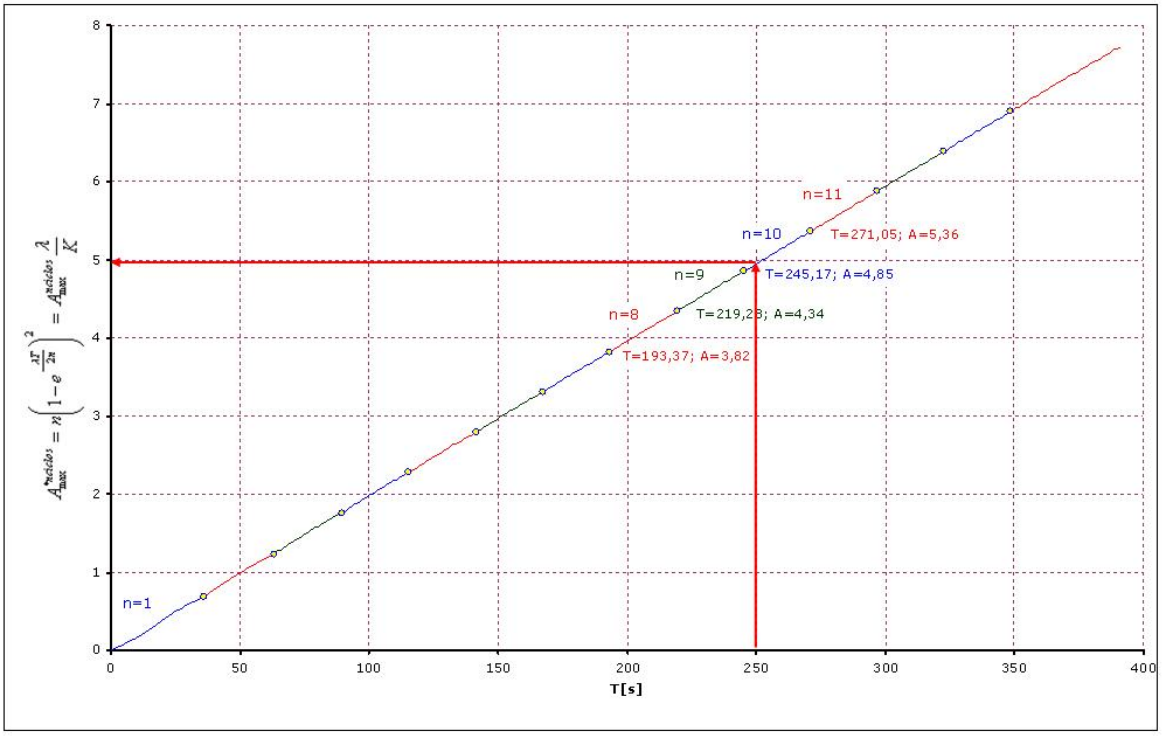


Figura 533. Determinación de la amplificación de la señal y del número de ciclos para un tiempo de proceso de 250 s.

Aunque en la página 509, (punto 8.4.2.1) se dijo que con 10 ciclos se podría llegar a amplificar la señal, como máximo hasta 10 veces (ec. [38]), ello supondría utilizar un tiempo de proceso según la Figura 517 superior a 1100 s. (Figura 534).

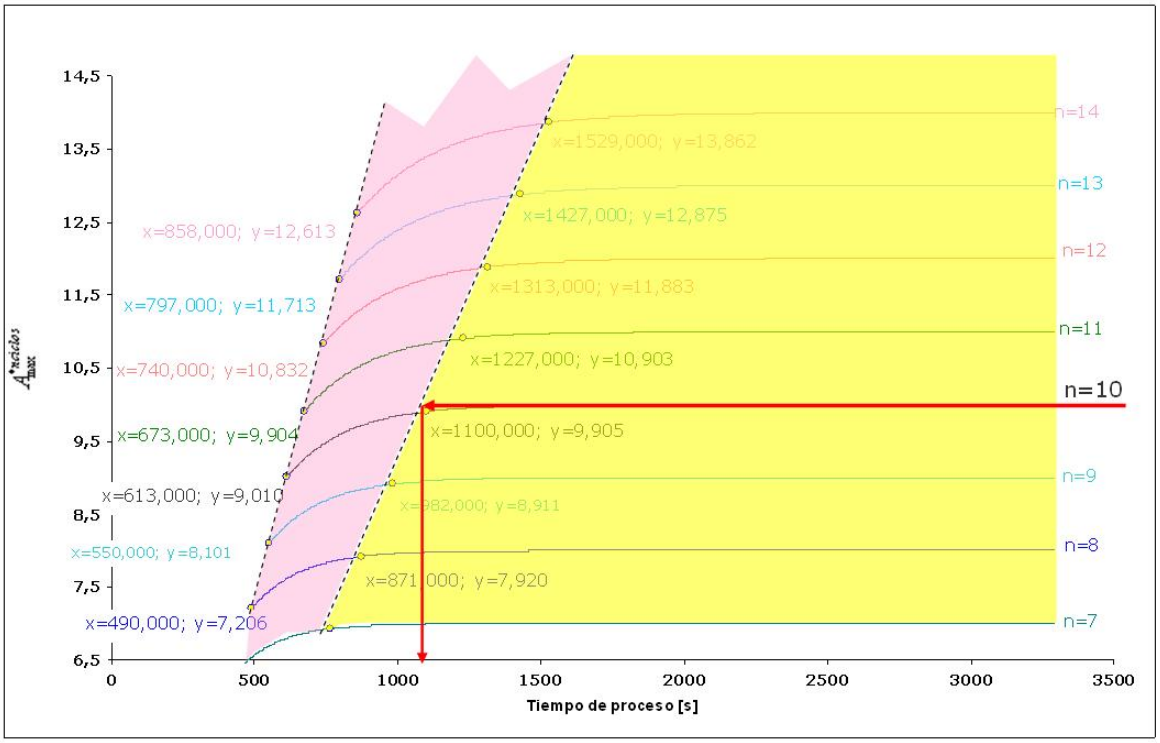


Figura 534. Tiempo de proceso necesario para una amplificación de la señal de 10.

[3] Supongamos que se dispone de 30 s, y se desea saber los ciclos de activación necesarios para conseguir la señal máxima.

Según la Figura 529 el número de ciclos debe ser igual a 1 y no se alcanza la señal máxima para un ciclo a no ser que se aumente el tiempo disponible.

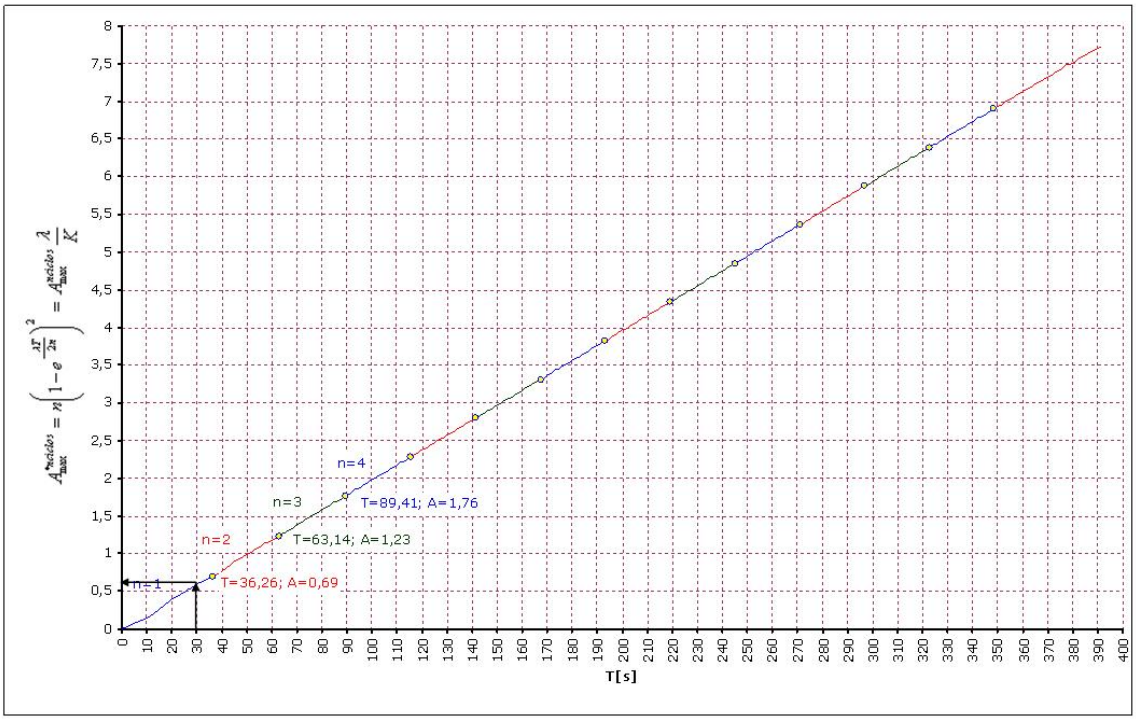


Figura 535. Ejemplo de cálculo.

8.5. Efecto del tiempo de desplazamiento en el cálculo del tiempo óptimo.

En todo el punto anterior 8.4 se ha considerado que la señal comienza a leerse inmediatamente después de ser irradiada la muestra. En realidad, es necesario un tiempo para desplazar la muestra desde su posición de irradiación hasta la posición de captura del espectro por el equipo de detección y medida. Denominamos este tiempo como tiempo de desplazamiento, y lo simbolizamos **d**.

Se considera que en el tiempo de proceso se incluyen dos veces el tiempo de desplazamiento, tal como se ve en la Figura 536, el primero de este tiempo se emplea en desplazar la muestra como se ha indicado anteriormente, y el segundo se emplea en el camino inverso. Vamos a repetir el estudio anterior considerando el tiempo de desplazamiento, inicialmente en un ciclo único, y después en varios ciclos.

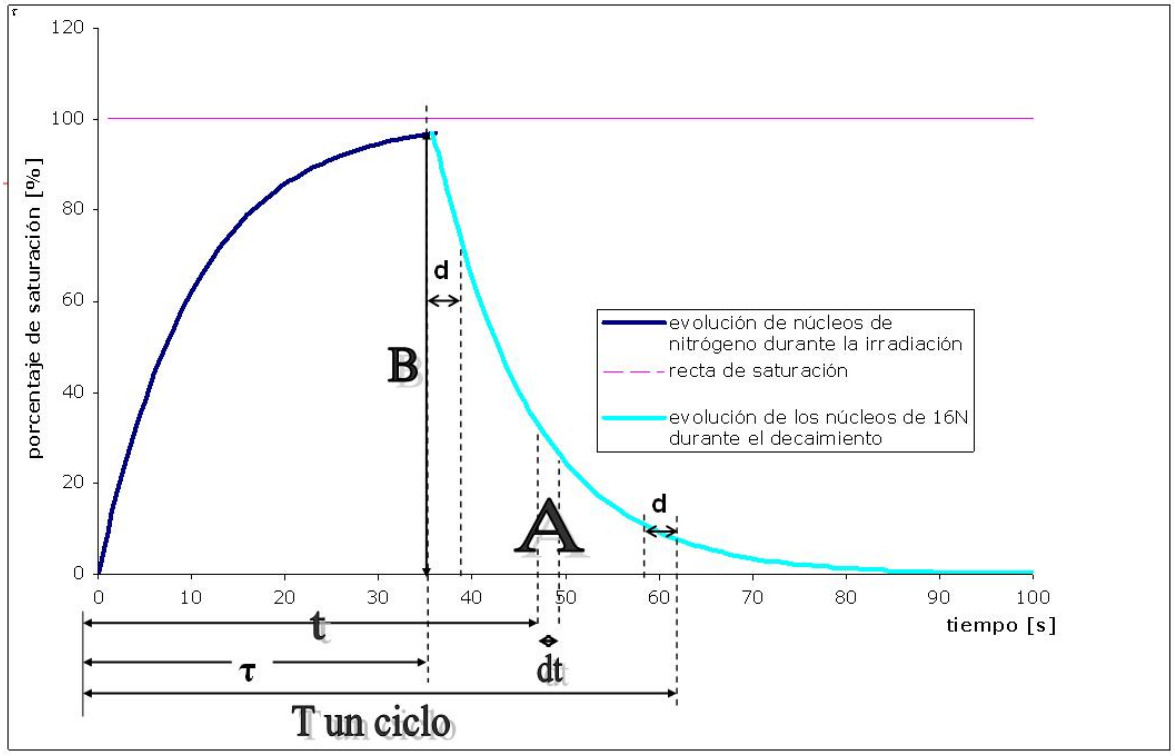


Figura 536. Ciclo de un periodo de irradiación y un periodo de medida considerando un tiempo de desplazamiento de la muestra d.

Para un ciclo único, la Figura 490 se transforma en la Figura 536 y la ecuación [22] de la página 481 se transforma en:

$$A = \int_{\tau+2d}^{T} h(t)dt = \int_{\tau+2d}^{T} Be^{-\lambda(t-\tau-d)}dt = \int_{\tau+2d}^{T} K(1-e^{-\lambda\tau})e^{-\lambda(t-\tau-d)}dt \qquad [40]$$

De donde,

$$A = K(1-e^{-\lambda\tau})\int_{\tau+2d}^{T} e^{-\lambda(t-\tau-d)}dt = K(1-e^{-\lambda\tau})\frac{-1}{\lambda}\left[e^{-\lambda(t-\tau-d)}\right]_{\tau+2d}^{T}$$

$$A = -\frac{K}{\lambda}(1-e^{-\lambda\tau})\left[e^{-\lambda(T-\tau-d)} - e^{-\lambda(\tau+2d-\tau-d)}\right],$$

De donde se llega a la expresión final:

$$A = -\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)\left(e^{-\lambda(T-\tau-d)} - e^{-\lambda d}\right) \qquad \textbf{[41]}$$

Analicemos de nuevo el valor de τ que hace que la señal sea máxima, y que denominaremos τ_{op}^{d}. Tenemos que derivar la expresión [41] respecto a τ y hacerla igual a cero.

$$\frac{dA}{d\tau} = \frac{K}{\lambda}\left(e^{-\lambda(T-\tau-d)} - e^{-\lambda d}\right)\frac{d}{d\tau}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right) + \frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)\frac{d}{d\tau}\left(e^{-\lambda(T-\tau-d)} - e^{-\lambda d}\right) = 0$$

de donde, eliminando K/λ y operando,

$$\left(e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)} - e^{-\lambda d}\right)\left(-(-\lambda)e^{-\lambda\tau_{op}^{d}}\right) + \left(1-e^{-\lambda\tau_{op}^{d}}\right)\left(\lambda e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)}\right) = 0$$

por lo que, eliminando λ,

$$\left(e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)} - e^{-\lambda d}\right)\left(e^{-\lambda\tau_{op}^{d}}\right) = -\left(1-e^{-\lambda\tau_{op}^{d}}\right)\left(e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)}\right)$$

y, de aquí,

$$\frac{e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)} - e^{-\lambda d}}{e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)}} = -\frac{\left(1-e^{-\lambda\tau_{op}^{d}}\right)}{e^{-\lambda\tau_{op}^{d}}}$$

simplificando,

$$1 - \frac{e^{-\lambda d}}{e^{-\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)}} = -\left(e^{\lambda\tau_{op}^{d}} - 1\right) = 1 - e^{\lambda\tau_{op}^{d}}$$

$$-e^{-\lambda d+\lambda(T-\tau_{op}^{d}-d)} = -e^{\lambda\tau_{op}^{d}}$$

$$-d + T - \tau_{op}^{d} - d = \tau_{op}^{d}$$

y,

$$-\lambda d + \lambda T - \lambda\tau_{op}^{d} - \lambda d = \lambda\tau_{op}^{d}$$

Finalmente,

$$\tau_{op}^{d} = \frac{T}{2} - d = \tau_{op} - d \qquad \textbf{[42]}$$

El máximo valor del área, que llamaremos $A_{\max}^{d}$ se obtiene sustituyendo la ecuación [42] en la ecuación [41] de donde tenemos,

$$A_{\max}^{d} = -\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda(T/2-d)}\right)\left(e^{-\lambda(T-\left(T/2-d\right)-d}-e^{-\lambda d}\right)=$$

De donde,

$$A_{\max}^{d} = -\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\left(T/2-d\right)}\right)\left(e^{-\lambda(T/2)}-e^{-\lambda d}\right) \quad \textbf{[43]}$$

Supongamos que en un tiempo de proceso total T, repetimos n veces un ciclo cuyo tiempo parcial es T/n. En este caso, la señal máxima de un ciclo de duración T/n es $A_{\max}^{d1ciclo}$, que viene dado por la expresión:

$$A_{\max}^{d1ciclo} = -\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\left(T/2n-d\right)}\right)\left(e^{-\lambda T/2n}-e^{-\lambda d}\right) \quad \textbf{[44]}$$

equivalente a la ecuación [29]. La señal total para n ciclos será el producto de $nA_{\max}^{d1ciclo}$, por lo que,

$$A_{\max}^{dnciclos} = -n\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\left(T/2n-d\right)}\right)\left(e^{-\lambda T/2n}-e^{-\lambda d}\right) \quad \textbf{[45]}$$

O bien,

$$A_{\max}^{dnciclos} = n\frac{K}{\lambda}\left(1-e^{-\lambda\left(T/2n-d\right)}\right)\left(e^{-\lambda d}-e^{-\lambda T/2n}\right) \quad \textbf{[46]}$$

ecuación equivalente a la [31]. Siguiendo el mismo procedimiento empleado anteriormente se transforma el término $A_{\max}^{dncilos}$ en:

$$A_{\max}^{*dnciclos} = A_{\max}^{dnciclos}\frac{\lambda}{K} = n\left(\left(1-e^{\lambda\left(T/2n-d\right)}\right)\left(e^{-\lambda d}-e^{-\lambda T/2n}\right)\right) \quad \textbf{[47]}$$

Se observa que esta ecuación es la misma que la ecuación [32] particularizada para d=0. $A_{\max}^{*dnciclos} = n\left(\left(1-e^{\lambda\left(T/2n-d\right)}\right)\left(e^{-\lambda d}-e^{-\lambda T/2n}\right)\right)$

Esta función para el valor d=0 se ha representado parcialmente en la figura 260 desde n=1 hasta n=14. Solo se ha representado la zona límite tal como se explicó para obtener la Figura 529. Igualmente a como se hizo en aquella figura, se representan por medio de un pequeño círculo, los puntos de intersección de las distintas curvas. Ambas figuras son prácticamente idénticas como era de esperar.

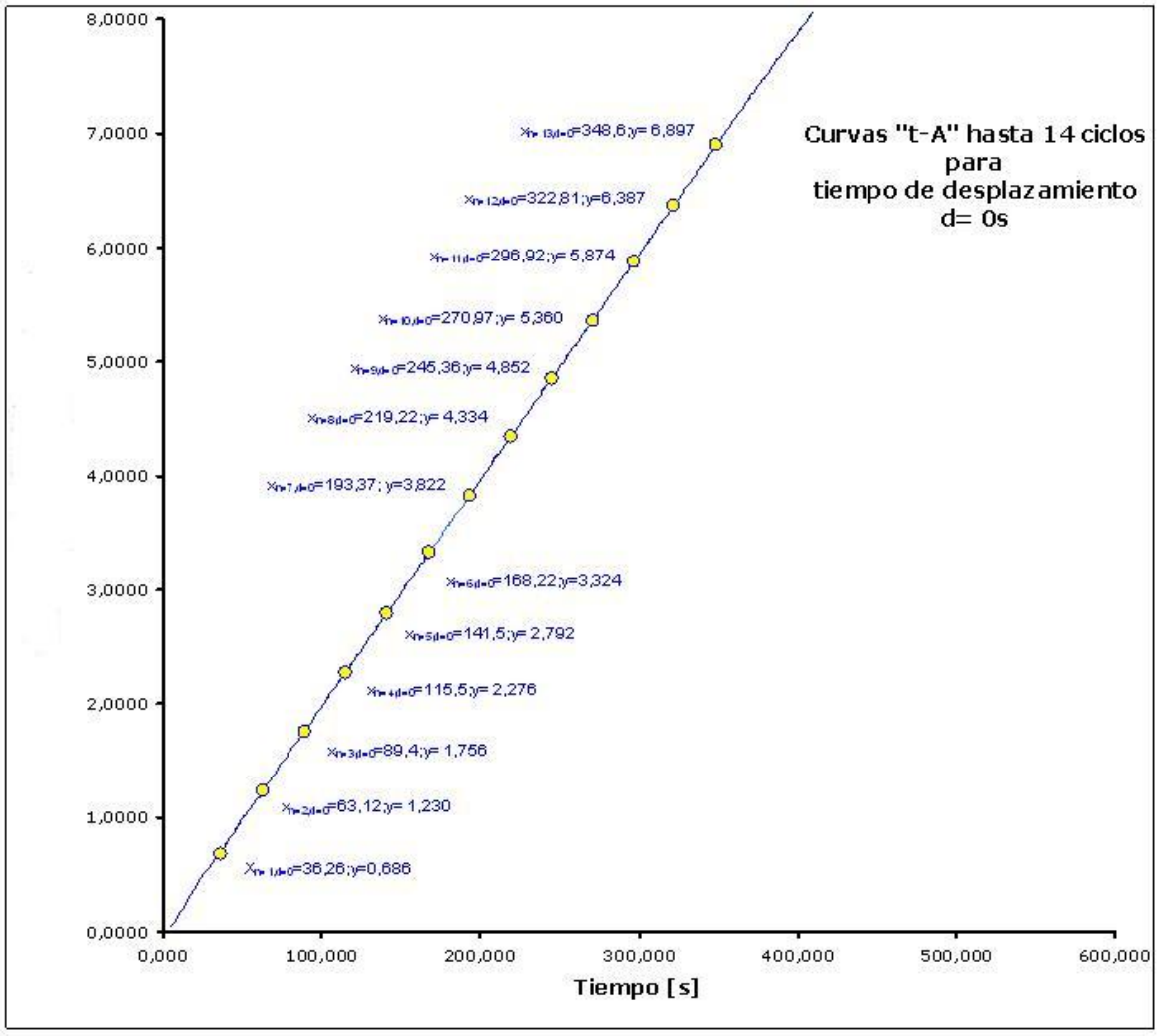


Figura 537. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=0. Eje ordenadas $A_{\max}^{*dnciclos}$.

Se ha repetido el proceso, para valores de *d* en la ecuación [47] para tiempos de desplazamiento de 1, 1,5 y 2 segundos. Se considera que este puede ser el rango de tiempos en los que sería posible realizar tal desplazamiento. Se han obtenido las Figura 538, Figura 539 y Figura 540 para los respectivos tiempos de desplazamiento.

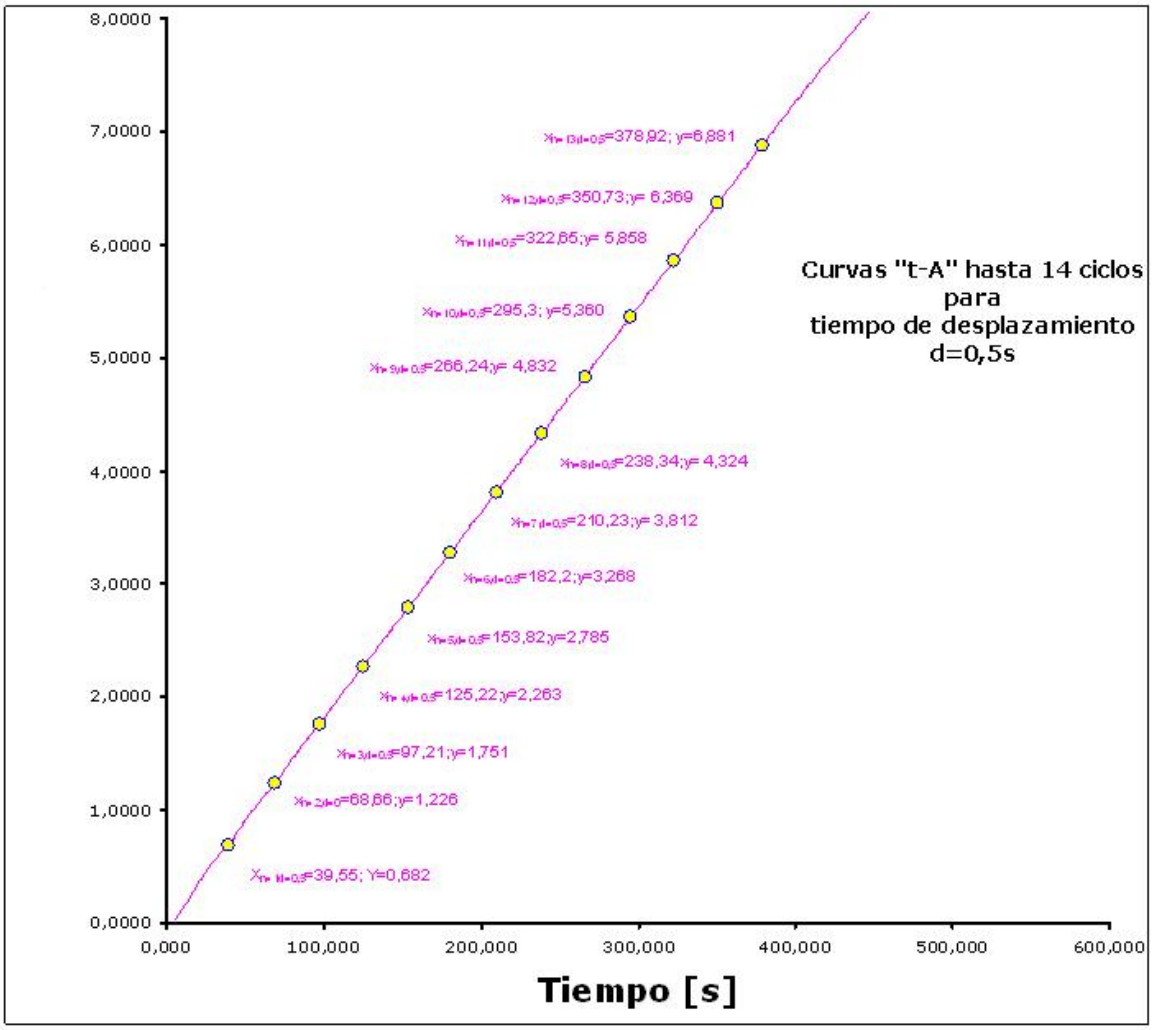


Figura 538. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=0,5 s. Eje ordenadas $A_{\max}^{*dnciclos}$.

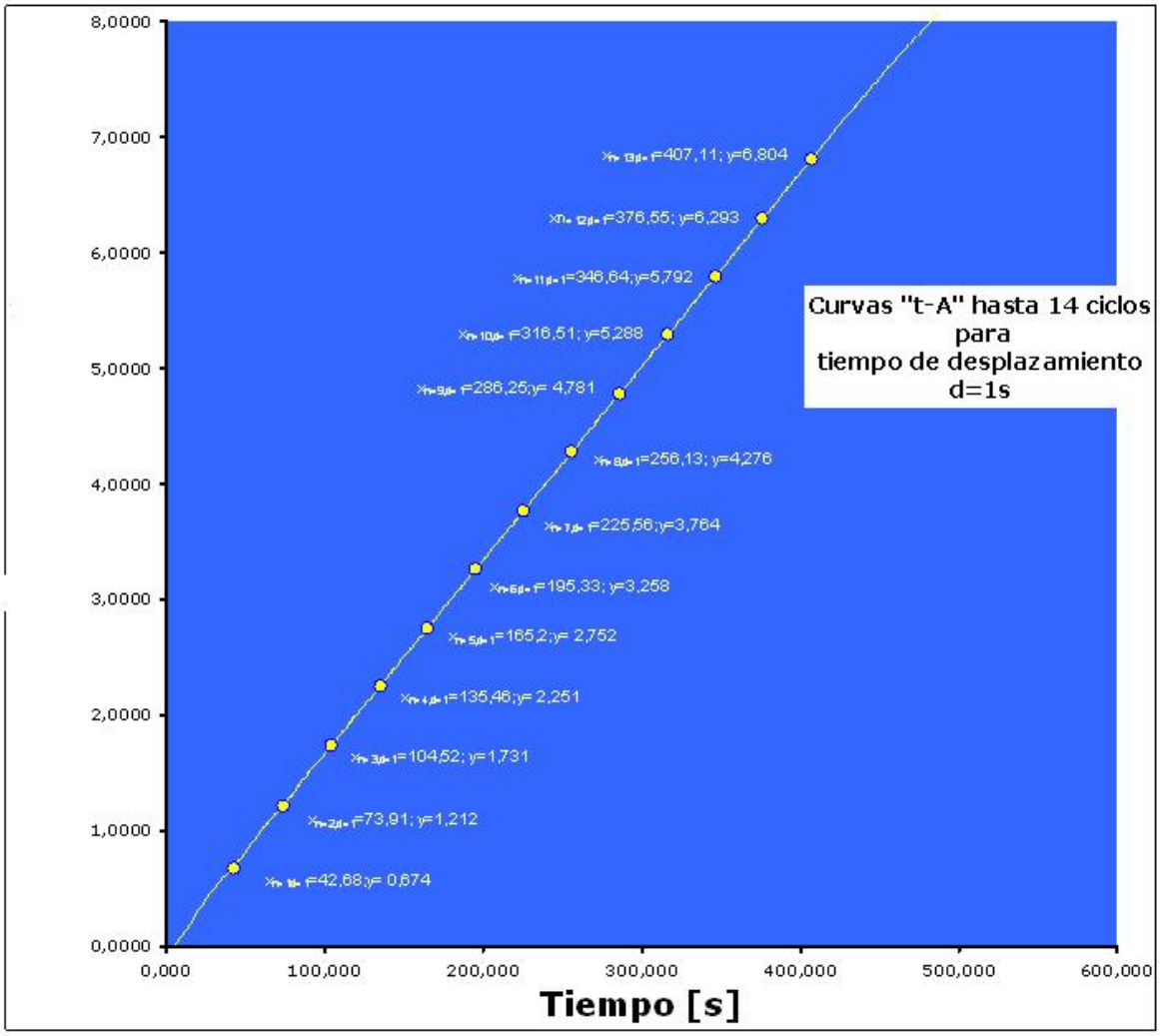


Figura 539. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=1 s. Eje ordenadas $A_{\max}^{*dnciclos}$.

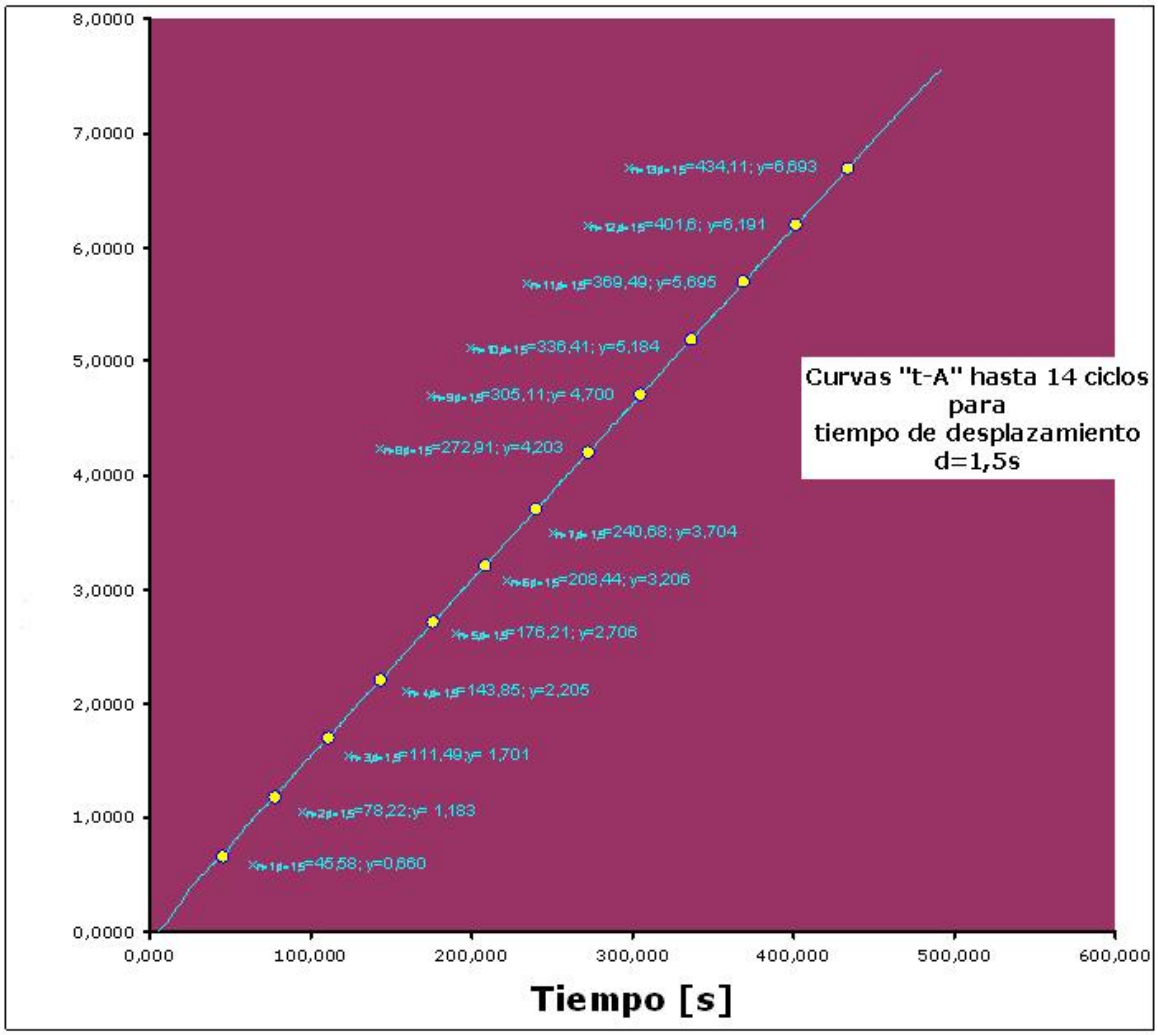


Figura 540. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=1,5 s. Eje ordenadas $A_{\max}^{*dnciclos}$.

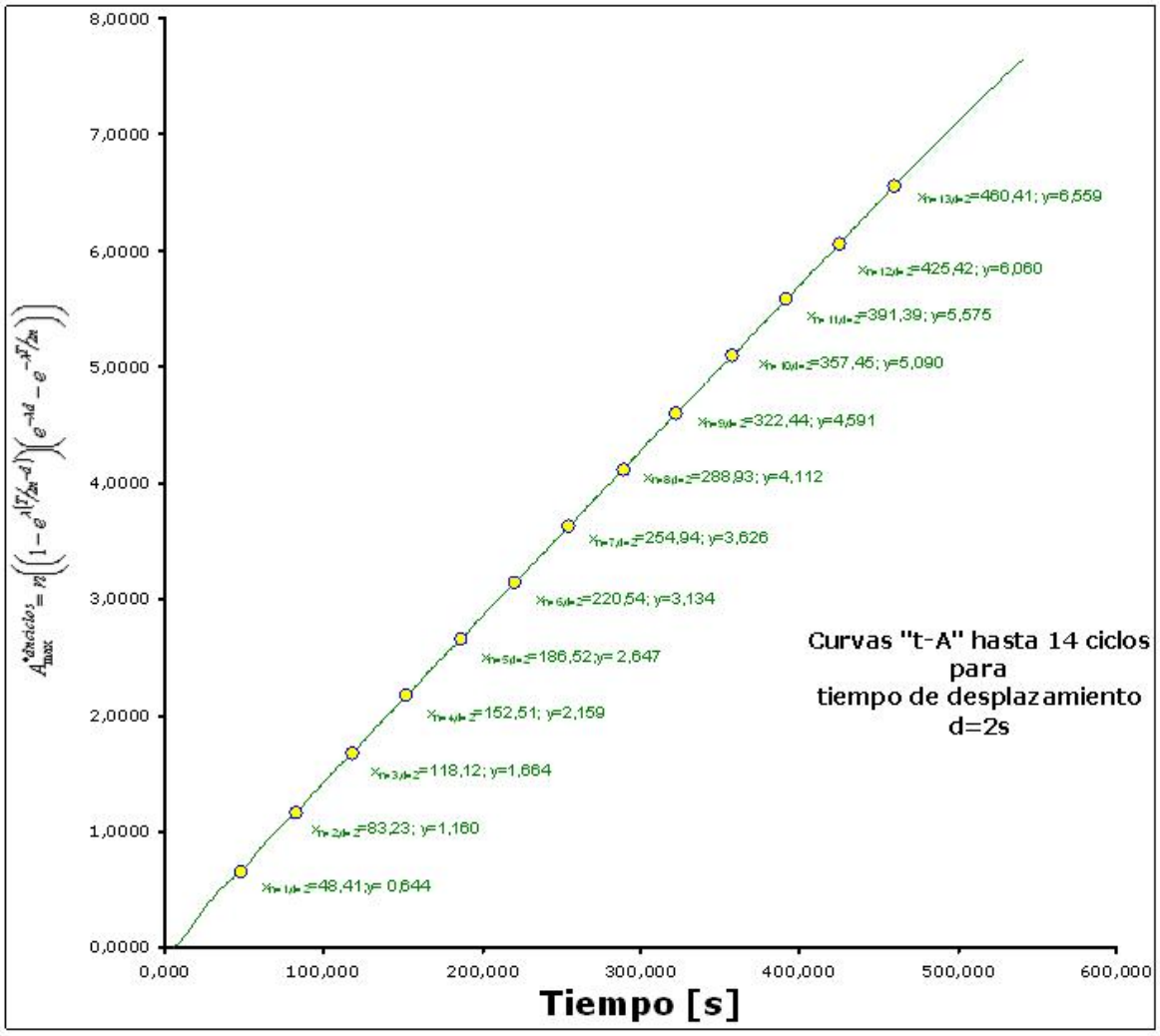


Figura 541. Curvas extremas de la zona límite, indicando los puntos de corte de los fragmento para d=2 s. Eje ordenadas $A_{\max}^{*dnciclos}$.

A continuación se representan en una misma gráfica los puntos de intersección de curva anteriores y se ha calculado la ecuación de la línea que une estos puntos para cada valor de d. La figura equivalente en el proceso anterior, era la Figura 530.

Se observa que los puntos siguen una línea recta para cada d, cuya ecuación está representada en las Figura 542 y Figura 543.

La pendiente de dichas rectas disminuye al aumentar el valor de d.

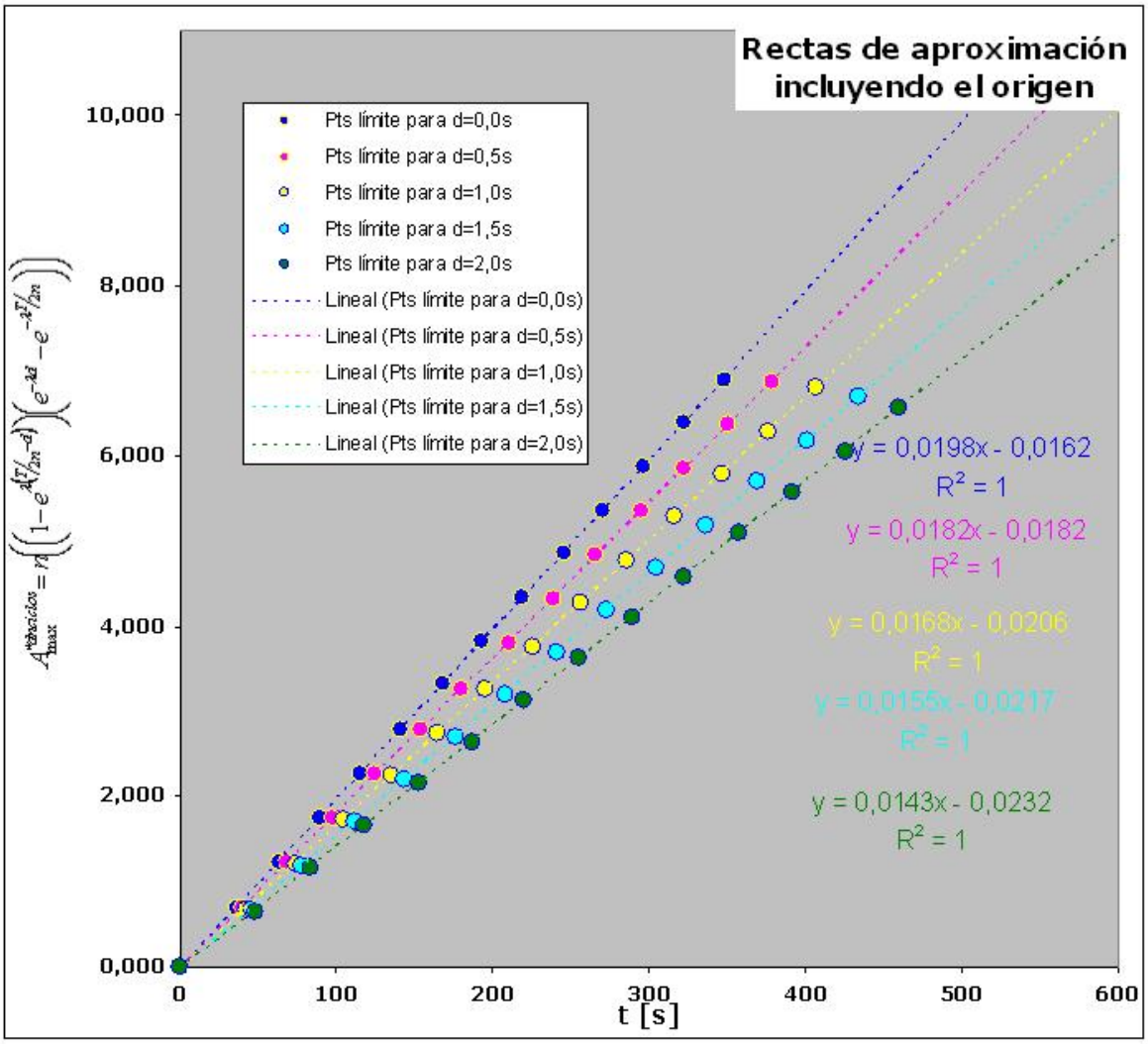


Figura 542. Rectas de aproximación, incluyendo el punto 0,0.

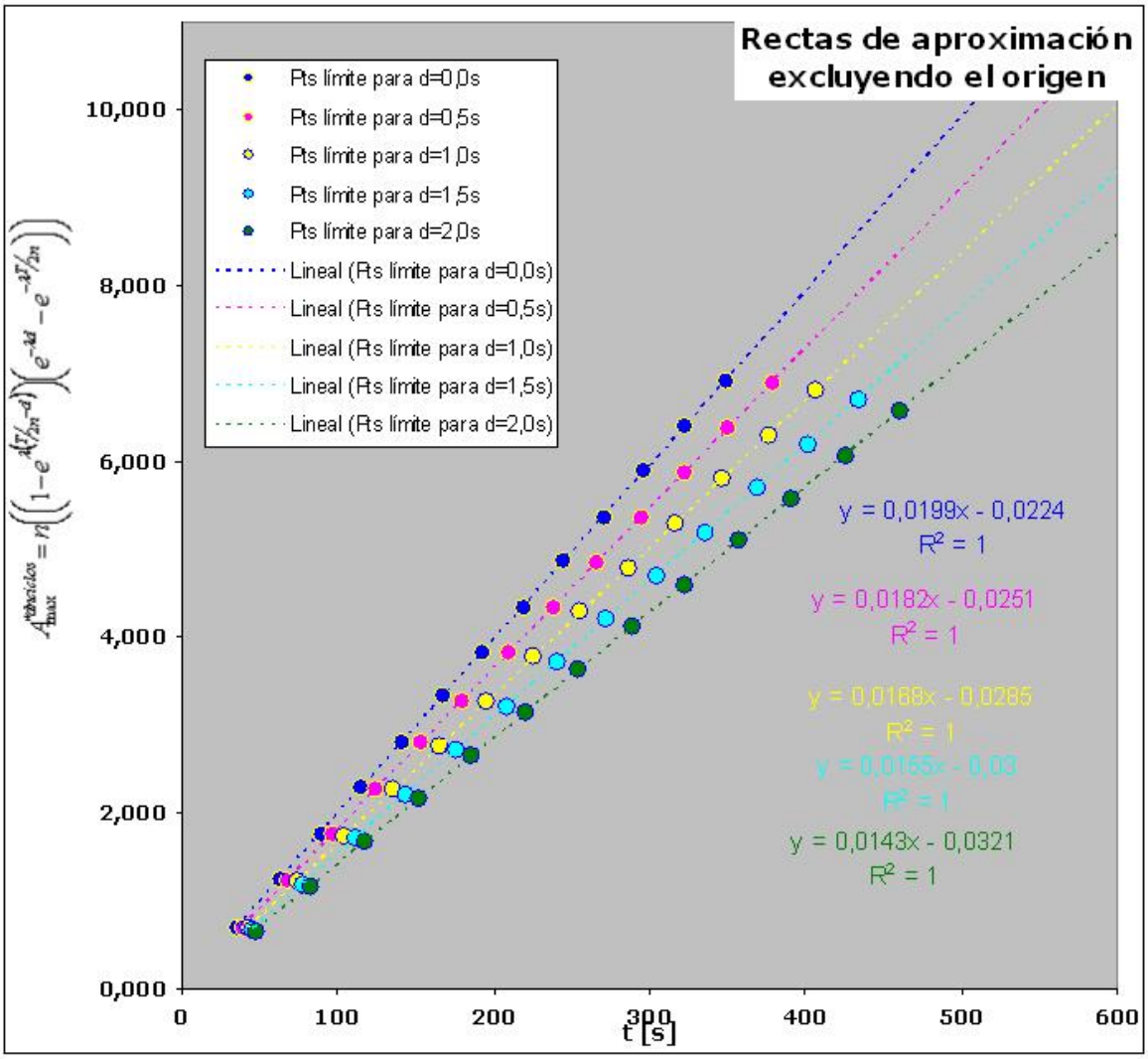


Figura 543.Rectas de aproximación, excluyendo en la nube de puntos el binomio 0,0.

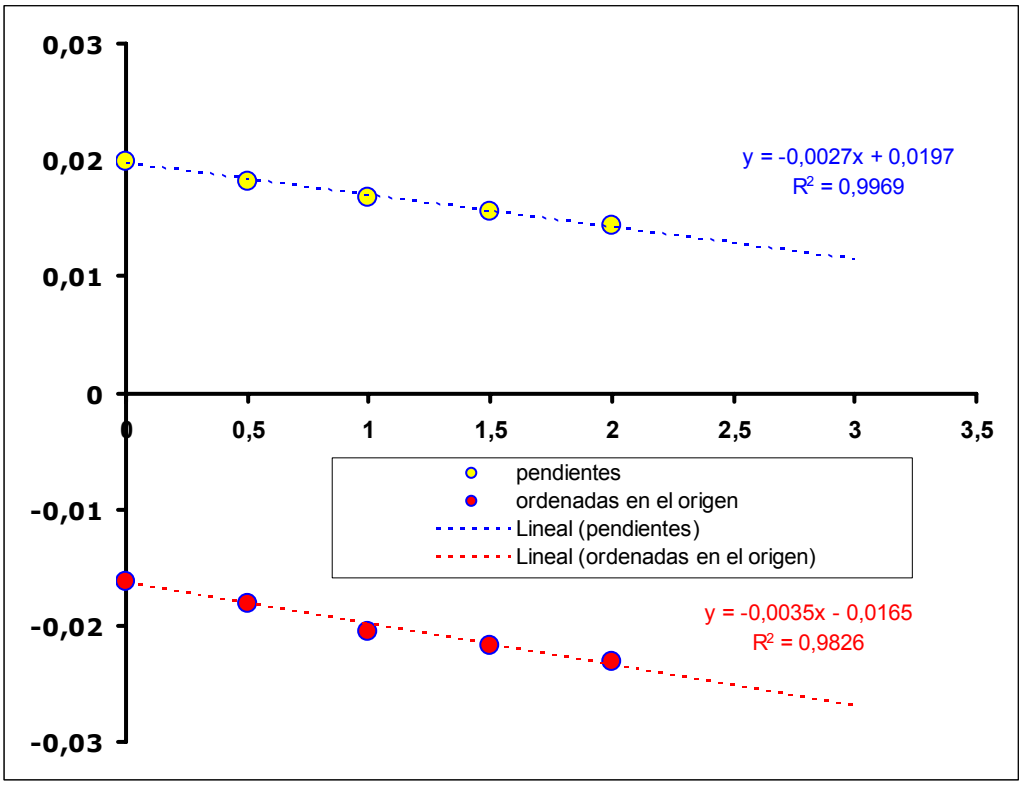


Figura 544. Correlación entre las pendientes y las ordenadas en el origen según el tiempo de desplazamiento d.

En la Figura 544 se representan las pendientes y las ordenadas en el origen de la familia de rectas correspondientes a la Figura 542. Según se observa en las ecuaciones del gráfico, el valor de $A_{\max}^{*dnciclos}$ correspondiente a un tiempo de proceso T y un tiempo de desplazamiento d responde a la fórmula:

$$A_{\max}^{*dnciclos} = -(0{,}0027 \cdot d + 0{,}0197) \cdot T - (0{,}0035 \cdot d + 0{,}0165) \quad [48]$$

La fórmula es válida para valores de d entre 0 y 2s.

9. Recapitulación final.

Se han analizado 12 elementos constitutivos de la muestra de fluorita, 468 reacciones de estos elementos con los neutrones y el decaimiento de 29 productos radiactivos.

En el rango de energías de los productos de decaimiento ha destacado, por su elevado valor, la energía de los rayos gamma originada en el decaimiento del 16N. Este elemento radiactivo solo puede ser originado por la reacción del flúor con los neutrones de este rango de energías. Por ello, la medida de los rayos gamma de energía del orden de 6000 keV, está directamente relacionada con la proporción de flúor en la muestra original. Como la vida media del 16N es 7,13 s. la radiación gamma emitida debe realizarse tan pronto como sea posible.

Después de la realización de múltiples ensayos con el primer prototipo, se consiguió que las lecturas de fondo fuesen lo suficientemente pequeñas y a su vez, se logró activar adecuadamente la fluorita, de manera que las lecturas dadas por la muestra activada destacasen sobre las medidas de fondo, y fuesen mayores cuanto mayor fuese la ley.

Se ha corroborado, por tanto con los ensayos con el primer prototipo, que la activación producida por la fuente de neutrones de 1 Ci. sobre el flúor de la muestra, es eficaz. Se comprobó que la distancia entre la muestra y la fuente debería de ser lo más pequeña posible para obtener una respuesta significativa.

Después de innumerables pruebas con el primer prototipo se consiguió mejorar la relación señal fondo, y se comprobó la proporcionalidad entre la ley de fluorita y la lectura de cuentas integradas en varios intervalos de interés.

Tras la fabricación del segundo prototipo se realizaron extensas series de ensayos totalizando más de 340. Estas series de experimentos tenían como objetivo encontrar los parámetros óptimos de la activación: tiempo de activación, tiempo de lectura, compactación, tamaño y granulometría de la muestra.

El número de cuentas obtenido en cada ensayo era tan bajo, que resultaba imposible visualizar los perfiles de energía del espectro.

Se ideó un procedimiento que solayaba este inconveniente y que consistió en sumar un elevado número de espectros procedentes de ensayos de iguales características y sobre muestas de la misma ley.

En el espectro así obtenido, se consiguen ver claramente los picos característicos del decaimiento del 16N.

Se ha realizado este mismo procedimiento para analizar el espectro del fondo, obteniéndose unos picos característicos que, según se ha comprobado, corresponden a la reacción 9Be(a,n)12C de la fuente de neutrones.

Se han realizado tres modelos matemáticos para realizar las regresiones de los resultados experimentales sobre estos tres modelos. Estos modelos contemplan que la cantidad de neutrones disminuye al aumentar la distancia a la fuente, o que los rayos gamma producidos en el decaimiento del 16N se atenúan en su paso con la muestra. Se ha obtenido que el modelo que representa más adecuadamente el fenómeno

es el que supone que en la activación de la muestra el flujo de neutrones varía inversamente con el cuadrado de la distancia de la fuente a la muestra. A su vez, se obtiene que la atenuación de los rayos gamma en la muestra es prácticamente despreciable.

Se han desarrollado varias líneas procedimentales de mejora de resultados con una instrumentación similar a la actual. Uno de ellos consiste en, a la vista del modelo matemático, modificar parámetros devla geometría de la muestra, tales como el diámetro, la masa y la compactación.

Otro consiste en un procedimiento de activación en múltiples ciclos. Se ha desarrollado minuciosamente un método que permite maximizar el número de cuentas obtenido en un ensayo. El procedimiento básico consiste en realizar el análisis mediante ciclos de características estrictamente determinadas. El número de ciclos, el tiempo de cada ciclo, el tiempo de desplazamiento y el nivel de cuentas esperado, están relacionados por una serie de fórmulas matemáticas que se expresan varias ecuaciones, tablas y gráficas.

La elaboración de esta Tesis ha supuesto el estudio minucioso de una docena de patentes, de una extensa bibliografía y cientos de consultas en bases de datos. Se destaca la necesidad para su elaboración, del uso de herramientas matemáticas, de diseño, de construcción y de edición, aparte del dominio de la base teórica sobre las reacciones nucleares que tienen lugar y comprensión técnica de las necesidades de la industria.

Finalmente se ha originado este documento que consta de más de 540 figuras, 270 tablas, 45 ecuaciones finales, 230 entradas bibliográficas y unas 50 fotografías.

Como ya se ha indicado, se ha solicitado, y ha sido aceptada su solicitud, una patente que se recoge en el Anexo: Patente solicitada.

9.1. Crítica de los resultados.

Se exponen en la Tesis absolutamente todos los resultados obtenidos en la experimentación, sin filtrar ni eliminar ningún dato, aunque alguno de ellos sea disonante con los modelos o con los otros datos.

Se ha considerado que estos datos disonantes otorgan veracidad al resto y dan información sobre algún aspecto que lleve a mejorar el procedimiento.

En varias tablas y gráficas se han representado las discrepancias entre las leyes obtenidas mediante análisis químico y las predichas por el modelo con los resultados de la activación neutrónica. Se juzga que estas predicciones se pueden calificar de **muy buenas**.

La instrumentación utilizada ha sido la que estaba disponible en el Departamento, que, funcionó perfectamente a pesar de su antigüedad. Existen en la actualidad equipos más modernos y más adecuados para estos niveles para estos niveles de energías.

Hay que tener en cuenta que el procedimiento de activación, que incluye el control del tiempo de activación, el control del tiempo de desplazamiento, el control del inicio de la lectura, el control de las

posiciones de irradiación y de la posición de lectura, ha sido totalmente manual.

El equipo se ha construido de manera artesanal, y el blindaje del detector ha sido progresivamente modificado hasta conseguir reducir la lectura del fondo. Esto ha supuesto una estructura de blindaje que solo puede ser considerada provisional válida solamente para estas primeras experiencias.

A pesar de ello, con los resultados obtenidos se han extraído conclusiones y se han ideado procedimientos respecto a la ejecución de ciclos repetidos, al tiempo del ciclo y respecto a la configuración de la muestra que son altamente prometedores.

Por todo ello, se augura que estos resultados son susceptibles de mejora.

9.2. Propuestas de investigaciones futuras en esta línea.

Con los resultados obtenidos hasta la fecha, se plantean nuevos proyectos con los siguientes objetivos:

- Aumentar el número de cuentas utilizando:
    - Ciclos repetidos,
    - Un tiempo de exposición y lectura adecuado según se ha indicado en el punto 8.4.3.
    - Comprobar la influencia del tamaño de la muestra y del grado de compactación de la misma tal como se ha indicado en el punto 8.1.
- Automatizar el proceso de desplazamiento de la muestra y el tiempo de exposición frente a la fuente y frente al detector. Para ello se propone utilizar un servoposicionador eléctrico de precisión (motor lineal).
- Utilizar el método en la determinación de otras sustancias relacionadas con las instalaciones mineras.
- Comprobar los resultados utilizando un equipo de detección más adecuado, incluyendo
    - Detectores de otros tipos como el BGO y otras dimensiones, por ejemplo 3*3 pulgadas.
    - Una fuente de neutrones de más actividad, por ejemplo 5 Ci.
    - Desarrollar un circuito electrónico específico que integre las cuentas en un rango de medida específico.
- Desarrollar, modificando el diseño actual un equipo para el análisis on line de la pulpa de la fluorita en tuberías.
- Desarrollar un sistema portátil capaz de determinar la ley de fluorita sobre un afloramiento o una superficie de mineral, como por ejemplo la pared de una galería.

- Desarrollar un sistema de detección sobre una sonda, para detectar y cuantificar la ley de la fluorita en sondeos.

9.3. Conclusiones

Los objetivos planteados en esta Tesis fueron:

[1] Analizar la posibilidad de realización de análisis de flúor en laboratorio a partir de muestras de fluorita utilizando métodos de activación neutrónica. En este sentido cabe decir las siguientes conclusiones:

a. Es posible realizar el análisis de muestras de fluorita por el método de activación neutrónica midiendo la radiación gamma diferida.

   En el mercado no existen equipos comerciales que utilicen el método de activación neutrónica para análisis de laboratorio de muestras de fluorita.

   Se ha realizado una minuciosa búsqueda y se ha encontrado que existen equipos de activación neutrónica para elementos de minerales diversos, lejos del campo de la fluorita. Generalmente, utilizan la detección de rayos gamma instantáneos.

   Se han buscado patentes y se han encontrado patentes similares para analizar otros minerales, pero no hay patentes que incluyan la fluorita.

b. No se han encontrado publicaciones sobre trabajos previos específicos de desarrollo de un equipo y un procedimiento de análisis del contenido en flúor de una muestra de fluorita, usando de las técnicas de activación neutrónica por el método DGNNA.

   Se han encontrado publicaciones realizadas sobre activación neutrónica y el flúor, pero se refieren a trabajos dentro del campo de la medicina y miden el flúor a través de la radiación gamma instantánea emitida por el 20F. Esto supone una diferencia ya que se utiliza una técnica distinta, PGNAA, sobre muestras líquidas y para una aplicación distinta. Además la fuente de neutrones que origina una reacción nuclear y un espectro de energía de los neutrones completamente diferente.

c. Es posible realizar el análisis de activación neutrónica utilizando como elemento productor de neutrones una fuente de neutrones.

   En el mundo de los análisis de activación neutrónica se utilizan con mucha frecuencia reactores nucleares de investigación. En el mundo existe un significante número de reactores nucleares destinados a la investigación. La mayor parte de estos reactores de investigación pertenecen a universidades o centros de investigación. Una de las actividades comerciales más frecuentes con la que estos centros se financian es ofreciendo análisis por activación neutrónica de elementos diversos.

d. Es posible realizar el análisis por activación neutrónica utilizando una fuente de neutrones tipo americio-berilio.

   En los equipos por activación neutrónica comerciales utilizados para la medida de diversos elementos en industrias mineras se utiliza mayoritariamente fuentes de neutrones de californio 252. Las fuentes de neutrones de Californio tienen un perfil de energía de los neutrones que según se ha visto, la hacen desaconsejable para el análisis de la fluorita. La zona de energía de máximo flujo de neutrones es inferior a la zona que se necesita para la activación del flúor.

e. Es posible realizar el análisis por activación neutrónica de la fluorita utilizando técnicas de activación neutrónica con una fuente de americio berilio de al menos 1 Curio.

   Para la realización de los análisis por activación neutrónica se ha visto que tanto el flujo de neutrones como su energía son parámetros críticos. Para obtener flujos mayores se necesita utilizar fuentes de neutrones de mayor actividad. Aunque el flujo de neutrones con el que se ha trabajado es 5 órdenes de magnitud inferior al flujo de neutrones utilizado por ejemplo en el interior de un reactor se ha comprobado que este flujo permite una precisión compatible con las necesidades industriales. No obstante la utilización de una fuente de mayor actividad permitiría obtener mayor precisión.

f. Es posible realizar el análisis por activación neutrónica de una muestra de fluorita por el método de activación neutrónica utilizando para la medida de la radiación gamma un detector de Ioduro de Sodio dopado con Talio.

   El rendimiento de medida de un detector de Ioduro de Sodio decrece a medida que crece la energía de los rayos gamma y es especialmente bajo para energía que superen los 2 MeV. En esta Tesis se demuestra que el bajo rendimiento del detector de INa no impide su uso para ser utilizado con esta técnica obteniendo resultados con precisiones compatibles con las necesidades industriales. Existen otro tipo de detectores que es necesario comprobar y que tienen mejor rendimiento que los de INa para el rango de energía de la radiación gamma en la que se necesita medir.

g. Es posible realizar el análisis por activación neutrónica de la fluorita utilizando un detector de NaI de 2”x2”.

   El rendimiento de medida de un detector de radiación esta relacionado con el tamaño del mismo. Los mayores detectores tienen rendimientos mayores. En el mercado existen detectores de centelleo de tamaños que llegan a ser tan grandes como 5”x5”. Parece previsible que con detectores de mayor tamaño se puedan obtener mejores resultados.

h. Es necesario para la realización del análisis por activación neutrónica de la fluorita disponer de un equipo multicanal que permita medir energías en un rango de medidas que alcance al menos los 8 MeV.

Se ha comprobado que con el conjunto de condiciones de medida con las que se ha desarrollado la Tesis, y que son las que demuestran la viabilidad del proceso, se obtienen cuentas en un rango muy amplio de energías, exigiendo que en el análisis se realice la separación de estas energías.

i. Es necesario blindar con plomo fuertemente el detector.

Se ha comprobado que dentro del margen de energías de interés se produce un contaje de fondo muy elevado que impediría utilizar el sistema si no se contase con el suficiente blindaje ya que se tendría una relación señal fondo muy baja.

j. El flúor es un elemento muy adecuado para realizar el análisis del mismo por el procedimiento de activación neutrónica.

El hecho de que el flúor solo presente un isótopo natural, es una facilidad para realizar este análisis. El tiempo de activación es una ventaja importante a favor de esta técnica para el flúor. El hecho de que se produzca nitrógeno 16 como elemento radiactivo más importante en el proceso de activación es una gran ventaja ya que la radiación más importante de este elemento se da en una franja de energía que tiene baja probabilidad de ser interferida por otros elementos.

[2] Construir un prototipo que permita realizar ensayos de laboratorio, y realizar estos ensayos. En este sentido caben destacar las siguientes conclusiones:

a. Se han realizado ensayos de laboratorio como se han explicado en el punto 6. y se ha obtenido que el flúor es una sustancia idónea para ser analizada por técnicas de activación neutrónica.

[3] Extraer conclusiones. Destacamos las siguientes:

a. Se ha demostrado a lo largo de esta tesis, que el resto de los elementos que están o pueden estar presentes en la muestra de fluorita no interfieren en la medida del contenido en flúor.

b. Para conseguir determinar la ley de la fluorita es necesario integrar las lecturas en el intervalo de energías entre 4,5 y 6 MeV para que, a través de la fórmula deducida en el modelo 1 se obtenga la ley de la fluorita en la muestra.

[4] Proponer un método industrial. Como resultado de la Tesis:

a. Se ha redactado, solicitado y ha sido aceptada una patente de invención que se muestra en el Anexo: Patente solicitada.

BIBLIOGRAFÍA.

I. BIBLIOGRAFIA.

A. Publicaciones.

[1] Abdullah Muhammad Sultan Almasoumi, (1978). "*Characterization of MIT-II facility for neutron activation analysis (Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Nuclear Engineering".* Thesis.

[2] Alfassi Zeev B., (1990). "*Activation analysis, Volúmenes I y II*"" CRC Press: Boca Raton, FL.

[3] Alfassi, Z.B, (1994). *"Chemical analysis by nuclear methods".* John Wiley and sons.

[4] Alfassi, Z.B, (1995). "*Prompt gamma neutron activation analysis*". Ed. Chien Chung.

[5] Allan D.L., (1961). "*An experimental test of the statistical theory of nuclear reactions".* Journal: Nuclear Physics. Vol 24, p. 274.

[6] Allen R., G.R. Bishop, P. Demers, H. Halban, (1948). "*Absorption Cross Section Measurement".* Journal: Nature. Vol.161, p.727.

[7] Amr Khairieh, (1987). "*The pottery from Petra: A neutron activation analysis study (BAR international series)".* B.A.R.

[8] Amsel G., D. Samuel, (1967). "*Microanalysis of the stable isotopes of oxygen by means of nuclear reactions*". Journal: Analytical Chemistry.Vol.39, p.1689

[9] Anand R.P., D.Bhattacharya, M.L. Jhingan, E. Kondaiah, (1979). "*Measurement of isotopic neutron capture cross-sections for V-51, Cu-63, Ga-71 ,Ge-74, As-75 ,Mo-98, Mo-100, Ru-104, In-115, Te-128, Te-130, Ce-140, Ce-142, Ho-165 at the neutron energy of (25+-5) keV."* Journal: Nuovo Cimento A. Vol.50, p.274.

[10] Anderson J, (1964). "*Neutron-activation analysis in man in vivo: A new technique in medical investigation"*. The Lancet Office.

[11] Anónimo. (1997). "*Radiation protection competency*". Department of Energy. United States of America.

[12] Bangert K., U.E.P. Berg, G. Junghans, R. Stock, K .Wienhard, (1982). *"Charged photoparticles from O-18 giant resonance".* Journal: Nuclear Physics, Section A.Vol.376, p.15.

[13] Bartle C.M., P.A.Quin, (1981). "*Total cross sections for the 40Ca(n,p) and (n,alpha) reactions between 2.7 and 5.5 MeV".* Journal: Annals of Nuclear Energy. Vol.8, p.43.

[14] Bass R., P. Haug, K. Kruger, B. Staginnus, (1966). "*Fast neutron excitation functions by activation techniques"*. Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC.No.66, p.64.

[15] Bayhurst B.P. , R.J. Prestwood, (1961). "*(n,p) and(N,ALPHA) excitation functions of several nuclei 7.0 to 19.8 MeV*". Journal: Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. Vol. 23. p. 173.

[16] Becchetti F.D., R.S. Raymond, D.A. Roberts, J. Lucido, P.A. Deyoung, B. Hilldore, J. Bychowski, A.J. Huisman, P.J. Vanwylen, J.J. Kolata, G. Rogachev, J.D. Hinnefeld, (2005). "*The (8Li,a) reaction at low energy: Direct 4H cluster transfer*". Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol.71, p.054610

[17] Becchetti F.D., W.Z. Liu, K. Ashktorab, J.F. Bajema, J.A. Brown, J.W. Janecke, D.A. Roberts, J.J. Kolata, K.L .Lamkin, A. Morsad, R.J. Smith, X.J. Kong, R.E. Warner, (1993). "Systematic of induced radioactive beam reactions: E=13-20 MeV". Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol.48, p.308.

[18] Beghian L.E., H.H.Halban, (1949). "*Absorption Cross Section Measurement*". Journal Nature (London); Vol.163, p.366.

[19] Bevington, P.R, (1969). "*Data reduction and error analysis for the physical sciences*". McGraw-Hill.

[20] Birn I., S.M. Qaim, B. Strohmaier, H. Freiesleben, (1994). "*Excitation functions of neutron threshold reactions on some isotopes of germanium, arsenic and selenium in the 6.3 to 14.7 MeV energy range* ". Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol 116, p. 125.

[21] Birn I.G., B. Strohmaier, H. Freiesleben, S.M. Qaim, (1995). "*Isomeric Cross Section Ratios for the Formation of* ^{75m},^{75g}*Ge in (n,p),(n,a), and (n,2n) Reactions from 6 to 15 MeV*". Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol.52, Issue.5, p.2546.

[22] Bidtel, (1.912) Análisis de la fluorita. Ind. Eng. Chem. 4, 201.

[23] Blatchley, G.E. Thomas, (1968). "*Study of the F19 (n,gamma)F20 Reaction*" Conference Report. . Argonne National Laboratory report series No.7282, p.71.

[24] Bohannon James R., (1969). "*Neutron activation analysis in water resources management in North Carolina".* Dept. of Nuclear Engineering, North Carolina State University.

[25] Booth R., W.P.Ball, M.H.Mac Gregor, (1958). "*Neutron activation cross sections at 25 keV".* Journal: Physical Review. Vol. 112, p. 226.

[26] Bormann M., C. Abels, W. Carstens, I. Riehle, (1967). "Excitation functions of some fast neutron reactions" Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC. Nº 76, p. 51.

[27] Bormann M., F. Dreyer, H. Neuert, I. Riehle, U. Zielinski, (1967). "*Measurements of some fast neutron cross sections with the activation method"* Conference: Nuclear Data for Reactors Conf. Vol.1, p.225.

[28] Bormann M., F.Dreyer, U.Zielinski. (1966). "*Measurements of some fast neutron cross sections with the activation method*". Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC; No.66, p.42.

[29] Bormann M., U.Seebeck, W.Voights, G.Woelfer. (1966), "*Level densities of some medium weight nuclei from evaporation spectra of the alpha particles from (n,alpha) reactions*". Zeitschrift fuer Naturforschung, Section A; Vol.21, p.988.

[30] Bostrom N.A., E.L. Hudspeth, I.L. Morgan, (1957). "*Deuteron-Induced Reactions Leading to N16".* Journal: Physical Review. Vol.105, p.1545.

[31] Bostrom N.A., E.L.Hudspeth, I.L.Morgan, (1955). "*Excitation curve for f-19(n,alpha)n-16. ".* Journal: Physical Review.

[32] Bramlit E.T., R.W. Fink, (1963). "*Rare nuclear reactions induced by 14.7 MeV neutrons"*. Journal: Physical Review. Vol 131, p. 2649.

[33] Brendle M., M. Morike, G. Staudt, G. Steidle, (1970). "*A Counter Telescope to Investigate (n,α) Reactions".* Journal: Nuclear Instrument and Methods in Physics Rest.Vol.81, p.141.

[34] Randall R., (1979)." *Energy dispersive x-ray fluorescence and neutron activation analysis of historic silk textiles*". Dept. of Clothing, Textiles and Interior Design, Kansas State University.

[35] Brookins D. G, (1981). "*Potassium-argon and neutron activation analysis studies of polyhalites near the WIPP site"*. Available from National Technical Information Service, U.S. Dept. of Commerce.

[36] Bruggeman A., W.Maenhaut, J. Hoste, (1979). "*Average cross sections for (n,p) and (n,α) reactions on F-19 and NA-23 in a fission neutron".* Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry.

[37] Brune D., (1968)." *Aspects of low temperature irradiation in neutron activation analysis (AE 332)".* Aktiebolaget Atomenergi.

[38] Bryan D. E, (1965). "*Use of neutron activation analysis in scientific crime detection".* available from the Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, National Bureau of Standards, U.S. Dept. of Commerce, Springfield, Va.

[39] Bryan D.E., (1964). "*Application of neutron activation analysis in scientific crime detection"*. Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information.

[40] Byrne A.R., (1974). "*Simultaneous neutron activation analysis of selenium with mercury in biological samples by volatilization (IJS report ; R-619)".* Institut Jozef Stefan.

[41] Campbell Mary Ann, Thesis. 1977. M.S*). "Characterization of the monkey neutron activation analysis facility at MIT".* Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Nuclear Engineering.

[42] Casanova J.L., M.L.Sanchez. (1976). "*Measurement of the (n,p),(n,alpha),(n,2n) cross sections of Zn,Ga,Ge,As,and Se for 14.1 Mev neutrons,and (n,p) cross section analysis.*". Anales de Fisica y Quimica; Vol.72, Issue.3, p.186.

[43] Chaturvedi S.N., R.Prasad, (1970). "*Measurement of (n, G) cross section by activation technique in the keV region*". Conference:Nucl. and Solid State Physics Symp., Madurai. Vol.2, p.615.

[44] Cohen B. L., (1951). "(n,2n) and (n,p) cross sections". Journal Physical Review. Vol 81, p. 184.

[45] Colditz J., P.Hille, (1968). *"Some (n, gamma) cross- section measurements for fast neutrons"*. Journal: Oesterr. Akad.Wiss., Math-Naturw. Kl., Anzeiger. Vol 105, p. 236.

[46] Conference, (1955). Ref: "1st UN Conf.Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva".

[47] Conference, (1963). Ref: *"Nucl.and Sol.State Physics Symp., Bombay".*

[48] Conference, (1965). Ref: *"Nuclear and Solid State Physical Symp".*

[49] Conference, (1973). Ref: *"Applications of Nuclear Data Symp".*

[50] Conference, (1978). *"Int.Conf.on Neutr.Phys.and Nucl.Data, Harwell"*.

[51] Conference, (1979). "2.Symp.on Neutron Induced Reactions, Smolenice".

[52] Conference, (1981). *"Symp.on Neutron Dosimetry, Munich-Neuherberg."*

[53] Corliss William R, (1968). *" Neutron activation analysis".* U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information; Rev edition.

[54] Cote R.E., L.M. Bollinger, J.M. Le Blanc, (1958). "*Measurement of the neutron strength function average level spacing for nuclides to 45 to 75 nucleons*". Journal: Physical Review. Vol. 111, p. 288.

[55] Cristu M.I., M.S. Popa, (1965). "*Gamma rays from AS-75(n,gAMMA)AS-76 reaction".* Journal: Revue Roumaine de Physique. Vol.10, p.949.

[56] Crouthamel, C.E, (1970) "*Applied gamma-ray spectroscopy*", 2nd Ed, Pergamon Press.

[57] Cuypers M, (1966). "*Gamma-ray spectra and sensitivities for 14 MeV neutron activation analysis"*. TexaS A. & M University.

[58] Davis E.A., F. Gabbard, T.W. Bonner, R. Bass, (1961). "*The disintegration of B10 and F19 by fast neutrons"* .Journal: Nuclear Physics. Vol. 27. p. 448.

[59] Davis Monte Vincent, (1971). "*Research services for neutron activation analysis."* Engineering Experiment Station, Georgia Institute of Technology.

[60] De Juren J.A., R.W. Stooksberry, (1960). "*Measurement of the O16(n,p)N16 cross section at 14.7 mev"*. Journal: Physical Review.Vol.127, p.1229.

[61] De Juren J.A., R.W. Stooksbury, M. Wallis, (1962*). "Measurement of the O16(n,p)N16 cross section from 11 to 19 MeV ".* Journal: Physical Review. Vol.120, p.901.

[62] De Lange P.W., C.B. Bigham, (1968). "*Multi-element detectors for activation resonance integral and resonance spectrum measurements*". Journal Nuclear Applications. Vol 4, p.190.

[63] De Soete, D, R. Gijbels, and J. Hoste, (1972), "*Neutron activation analysis*". John Wiley and sons.

[64] Dibbs H. P, (1969). "The application of neutron activation analysis to the determination of copper in minerals (Canada. Mines Branch. Research report R 205)". Dept. of Energy, Mines and Resources, Mines Branch.

[65] Diksic M., P. Strohal, G. Peto, P. Bornemisza-Pauspertl, I. Hunyadi, J. Karolyi, (1970). "*Additional measurements of the radioactive capture cross sections for 3MeV neutrons*". Journal: Act Physical Hungarian Vol.28, p.257.

[66] Dimbylow P., (1980). "*Neutron cross- sections for elements of biomedical importance from 20 to MeV"*. Journal: Physics in Medicine and Biology.Vol.25, Issue.4, p.637.

[67] Dresler J., J.Araminowicz, U.Garuska, (1973). "*Cross sections of the (n,p) reactions at 14.6 MeV for 13 nuclides "*.Progress Report Inst. BadanJadr.(Nucl.Res.), Swierk+ Warsaw, Repts.No.1464, p.12.

[68] Dubansky Alois, (1974). "*Radiogenic Argon, its Determination by the Neutron-Activation Analysis".* Academia

[69] Ehmann, W.D. and D.E Vance, (1991*)," Radiochemistry and nuclear methods of analysis".* John Wiley and sons.

[70] Elek A., (1974). "*Investigation of the I.A.E.A. air-3, 1972, simulated air filter intercomparison sample by neutron activation analysis (KFKI)".* Hungarian Academy of Sciences, Central Research Institute for Physic.

[71] Foroughi F., J. Rossel, (1972). "Study of differential cross sections of the reactions (n,p) and (n,α) on F-19, SI-29, S-32 and CA-40 at 5.85 MeV". Journal: Helvetica Physical Act. Vol.45, p.439.

[72] Fortna Terry L, (1975). "*Nondestructive neutron activation analysis of water contaminants".* Miami University.

[73] Friedlander, G.,J. W. Kennedy, E.S. Macias, and J. M. Miller, (1981). "*Nuclear and radiochemistry"*. John Wiley and sons.

[74] Fukuzawa F., (1961*)." Isometric cross section ratios for 14 MeV neutron"*. Journal: Journal of the Physical Society of Japan. Vol 16, p. 2371.

[75] Furr A., (1969)." *Neutron activation analysis*". Virginia Polytechnic Institute.

[76] Gabbard F., R.H. Davis, T.W. Bonner, (1959). "*Study of the neutron reactions LI-6(N,ALPHA)H-3, F-19(n,gAMMA)F-20 and I-127(n,gAMMA)I-128"*. Journal: Physical Review. Vol.114, p.201.

[77] Garg J.B., W.W. Havens Jr, J. Rainwater,. (1964). "*Neutron Resonance Spectroscopy.IV. As and Br*." Journal: Physical Review. Vol. 136, p. 177.

[78] Garuska U., J.Dresler, H.Malecki, (1978). "*Cross sections measurements of the (n,α) reaction at 14.6 MeV neutron energy*". ProgressReport:Inst.BadanJadr. (Nucl.Res.), Swierk+Warsaw, Repts.

[79] Gibbons J.H., R.L. Macklin, P.D. Miller, J.H. Neiler, (1961). "*Average radioactive capture sections for 7 to 170keV neutrons"*. Journal: Physical Review.Vol.122, p.182.

[80] Gijbels R, (1969). *"The industrialisation of 14 MeV neutron activation analysis for oxygen in steel: Report prepared by the University of Ghent, Belgium".* The University.

[81] Girardi F, (1965). *"Data handbook for sensitivity calculation in neutron activation analysis".* Presses Academic Europeans.

[82] Glascock Michael D., *(2004)."Un vistazo general al análisis por activación neutrónica"* University of Missouri research reactor (MURR)

[83] Glascock, M.D, (1991). *"Tables for neutron activation analysis",* 4th ed. The Missouri University Research Reactor Center-. Columbia.

[84] Gleason G., (1975). *"Thermal neutron cross sections and (n. gamma) resonance integrals part I".* Journal: Radiochem. and Radioanal. Letters. Vol 23. p 317.

[85] Glickstein S.S., R.G. Winter, (1963). *"Properties of F20"*. Journal: Physical Review.Vol.129, p.1281.

[86] Green R.E.L., R.G. Korteling, K.P. Jackson, (1984). *"Inclusive production of isotopically resolved Li through Mg fragments by 480 MeV p+ag reactions".* Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics.Vol.29, p.1806.

[87] Grochulski W., S. El-Konsol, A. Marcinkowski, (1975). *"Excitation curves for fast neutron induced reactions on Ga-71, As-75, Se-80, Se-82, Sn-117 and Sn-118"* . Journal:Acta Physica Polonica.Vol.6, p.139.

[88] Groshev L.V., B.P. Ad`yasevich, A.M. Demidov, (1955). *"Thermal neutron capture gamma rays".*Conference 1st UN Conf.Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva 1955; Vol.2, p.39(P/651).

[89] Gueltekin E., V.Bostan, M.N.Erduran, M.Subasi, M.Sirin, (2001). "Cross-Section Measurements For Short-Lived Isotopes of 46Ti, 75As, 92Mo and 97Mo At the Neutron Energies from 13.6 to 14.9 MeV". Journal: Annals of Nuclear Energy. Vol.28, p.53.

[90] Guinn Vincent P, (1965). *"Advances in neutron activation analysis (Progress in nuclear energy)".* Pergamon Press.

[91] Gupta J.P., H.D.Bhardwai, R.Prasad, (1985). *"Pre- equilibrium emission effect in (n,p) reaction cross section at 14.8 MeV"*. Journal: Pramana Vol.24, p.637.

[92] Hardell R., A. Hasselgren, (1969). *"Thermal neutron capture in F-19"*.Journal: Nuclear Physics, Section A.Vol.123, p.215.

[93] Harris S.P., C.O. Muehlhause, G.E. Thomas, (1950). *"Low energy neutron resonance scattering and absorption"*. Journal: Physical Review. Vol. 79, p. 11.

[94] Hasan S.S., A.K. Chaubey, M.L. Sehgal, (1968). *"Neutron activation cross sections at 24 keV"* Journal: Nuovo Cimento B. Vol.58, p.402.

[95] Hayodom Vichai, Wunlop Boonkong, Sakow Mahapanyawong, Chavee Chaimonkon, (1969). *"Resonance integral measurements"*. Atomic Energy for Peace, Bangkok Reports. No.23.

[96] Heaton R. K. , H. W. Lee, and B.C. Robertson, E.B. Norman, K. T. Lesko, and B. Sur. (1997) "α- particle induced *γ- rays transitions in light elements* ". *Physical review C*

[97] Heft R.E., (1978). "*A consistent set of nuclear- parameter values for absolute instrumental neutron activation analysis*". Conf. on Computers in Activ.Analysis.

[98] Henkel R.L., H.H. Barschall, (1950). "*Nuclear Physics".* Journal: Physical Review. Vol.80, p.145.

[99] Heydorn K, (1966). "*Pre-irradiation separation for the determination of vanadium in blood serum by reactor neutron activation analysis".* Gjellerups Boghandel

[100] Hill J.C., D.G. Shirk, R.F. Petry, K.H. Wang, (1975). "*Effective cross sections for the (N,2PN),(N,2P), and (N,3PN) reactions using intermediate-energy neutrons"*. Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol 12, p. 1978.

[101] Hicks K.H., A.Celler, O.Haeusser, R.Henderson, K.P.Jackson, B.Pointon, J.Rapaport, M.Vetterli, S.Yen. (1991). "Multiploe strength in 16O(n,p)16N at 298 MEV. ". Physical Review, Part C, Nuclear Physics; Vol.43, p.2554.

[102] Hochel R. C, (1980)." *A high-capacity neutron activation analysis facility (GJBX)".* Available from National Technical Information Service.

[103] Hoffman Buren W., **(**1967)**.** **"***Basic, multi-option neutron activation analysis program for the digital computer"*. U.S. Dept. of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Southwestern Radiological Health Laboratory.

[104] Holloway James Paul, Hatice Akkurt. (2003). "*An existence proof for a problem I prompt gamma neutron activation analysis".* Nuclear Mathematical Sciences: A Century Anew Gatlinburg.

[105] Hoyler F., J.Jolie, G.G.Colvin, H.G.Boerner, K.Schreckenbach, P.Van Isacker, P.Fettweis, H.Gokturk, J.C.Dehaes, R.F.Casten, D.D.Warner, A.M.Bruce, (1990). "*Spectroscopy of the odd-odd nucleus 76-as and its supersymmetric description".* Journal: Nuclear Physics, Section A. vol 512, p. 189.

[106] Hughes D.J., R.C.Garth, J.S.Levin, (1953). "*Fast Neutron Cross Sections and Nuclear Level Densities*" Journal: Physical Review. Vol 91, p. 1423.

[107] Hummel V., B. Hamermesh, (1951). "*Activation cross sections measured with antimony- berylium neutrons"*. Journal: Physical Review. Vol. 82, p.67.

[108] Ikeda C. Y., K.Oishi, K.Kawade, H.Yamamoto, H.Maekawa, (1993). "*Activation Cross Section Measurements at Neutron Energy from 13.3 to 14.9 MeV".* Report: JAERI Tokai report series No.1329.

[109] Jarczyk L. , B. Kamys, A. Magiera, A. Strzlkowski, A. Szczurek, K. Bodek, M. Hugi, J. Lang, R. Muller, E. Ungricht, (1985). "*Reactions in the 9-Be+9-Be System at Low Energies".* Jour. of Physics, Part G (Nucl.and Part.Phys.).Vol.11, p.843.

[110] Jarvis, K. Williams J. (1989). "*The analysis of geological samples by slurry nebulisation inductively coupled plasma mass spectrometry*". Chem. Geol. 77.

[111] Jester William A., (1974). "*Identification and evaluation of water tracers: Amenable to post-sampling neutron activation analysis".* Institute for Research on Land and Water Resources, Pennsylvania State University.

[112] Johns H. E. and J. R. Cunningham (1983) "*The physics of radiology*".Charles C Thomas Publisher.

[113] Johnsrud A.E., M.G .Silbert, H.H. Barschall, (1959). "*Energy dependence of fast- neutron activation cross section*" Journal: Physical Review. Vol. 116, p. 927.

[114] Journal, (1964) and (1965). Ref: "*Helvetica Physical Act".*

[115] Julien J. (1968). "S*tudy of some s-wave neutron resonance parameters of target with i=1/2 and i=3/2 as a function of the spin value j=i+-1/2 in the energy range 1 ev to 50000 ev".* Centre d'etudes nucleaires. Saclay reports. Nº 3385.

[116] Julien J., C.Corge, V.D.Huynh, J.Morgenstern, F.Netter. (1962). "P*roprietes particulieres de certaines resonances de transmission aux neutrons presentees par des noyaux de la region moyenne*". Comptes Rendus, Serie B, Physique; Vol.254, p.4009.

[117] Julien J., G.Bianchi, C.Corge, V.-D.Huynh, G.Le Poittevin, J.Morgenstern, F.Netter, C.Samour. (1964). "*Variation de la fonction densite (strength function) avec la valeur du spin*". Physics Letters; Vol.10, p.86

[118] Julien J., S.De Barros, G.Bianchi, C.Corge, V.D.Huynh, G.Le Poittevin, J.Morgenstern, F.Netter, C.Samour, R.Vastel. (1966). "*Determination du Spin et des Parametres des Resonances pour* ^{197}*Au+n de 10 eV a 1000 eV*". Journal Nuclear Physics, vol 76, p, 391.

[119] Julien J., S.De Barros, V.D.Huynh, G.Le Poittevin, J.Morgenstern, F.Netter, C.Samour. "*Variation de la Fonction Densite (Strength Function) avec la Valeur du Spin"* Journal Nuclear Physics, vol 66, p, 433.

[120] Kalebin S.M., (1964). "*On the spin dependence of the total radiation widths o levels in As 75".* Report Joint Inst. for Nucl. Res., Dubna, reports; No.1845, p.51.

[121] Kantele J., D.G. Gardner,(1962). "*Some activation cross sections for 14.7 Mev neutrons".* Journal: Nuclear Physics. Vol. 35, p. 353.

[122] Kapchigashev S.P., Yu.P.Popov, (1966). "*Determination of level densities and the parameter a from the average capture cross sections".* Journal Yadernaya Fizika; Vol.4, Issue.4, p.686.

[123] Karadag M., H. Yucel, M. Tan, A. Ozmen, (2003). "*Measurement of thermal neutron cross-sections and resonance integrals for Ga-71(n,g)Ga-72 and As-75(n,g)As-76 by using Am-241-Be isotopic neutron source. "* Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.A. Vol.501, p.524.

[124] Kaul O.N., (1962). *"Alpha particles from the interaction of 14 MeV neutrons with arsenic"*. Journal: Nuclear Physics. Vol.29, p.522.

[125] Keisch B.**,** **(**2003). *"The Atomic Fingerprint: Neutron Activation Analysis."* University Press of the Pacific.

[126] Kennett T.J., W.V. Prestwich, J.S. Tsai, (1987). *"A re-examination of the 19F(n,gAMMA)20F reaction".* Journal: Canadian Journal of Physics. Vol.65, p.1111.

[127] Kerisch, B, (1972). *"The atomic fingerprint: neutron activation analysis".* Userda-Technical information center, Washington,DC.

[128] Kinsey B.B., G.A. Bartholomew, and W. H. Walker. (1950)*."Neutron capture γ- rays from leads and bismuth".* Physical review. Division of atomic energy, National research council of Canada.

[129] Knellwolf T., J.Rossel, (1966). "Investigation *of the reactions and F-19(N,ALPHA)N-16 by neutrons of 6 MeV*". Journal: Helvetica Physical Act.Vol.39, p.376.

[130] Knoll, Glen F, (1989). *"Radiation detection and measurement",* 2nd Ed, John Wiley and sons.

[131] Koester L., K. Knopf, W. Waschkowski, A. Kluever, (1984). "Inteactions of neutrons with gallium and its isotopes". Journal: Zeitschrift fuer Physik, Section A. vol 318. issue 3, p. 347.

[132] Kruger, P, (1971). *"Principies of activation analysis".* Wiley interscience: New York.

[133] Lahlou F., B.Cujec, B.Dasmahapatra, (1988). *"Cross section measurements for the 9Be+9Be System at subbarrier energies"*. Journal: Nuclear Physics, Section A.Vol.486, p.189.

[134] Leclerc JC, (1974*). "Leclerc Neutron Activation Analysis Tables (Hardcover)".* John Wiley and Sons Ltd.

[135] Lu C.C., M.S.Zisman, B.G.Harvey, (1969). *"High-spin states of configuration (1d5/2)5+,0**2 and (1g9/2)9+,0**2 strongly populated by the (a,d) reaction".* Journal: Physical Review. Vol.186, p.1086.

[136] Lyon W.S., (1960). *"Reactor neutron activation cross sections for a number of elements".* Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol. 8, p. 378.

[137] Lyon W.S., R.L. Macklin, (1959). *"Neutron activation at 195 keV".* Journal: Physical Review. Vol. 114, p. 1619.

[138] Lyon W.S., R.L. Macklin, (1959). *"Neutron activation at 195keV". Journal*:Physical Review.

[139] Macklin R.L. , J.H. Gibbons, T. Inada, (1936). *"Neutron capture cross sections near 30keV using a MOXON-RAE detector".* Journal: Nuclear Physics. Vol.43, p.353.

[140] Macklin R.L. , J.H. Gibbons, T. Inada, (1963). *"Average radioactive capture cross sections for 30 and 65 keV neutrons*". Journal: Physical Review. Vol. 129. p. 2695.

[141] Macklin R.L. , N.H. Lazar, W.S. Lyon, R.L. Macklin, N.H. Lazar, W.S. Lyon. (1957). *"Neutron activation cross sections with Sb-Be neutron"*. Journal: Physical Review. Vol. 107, p. 504.

[142] Macklin R.L. , R.R. Winters, (1973). *"Neutron Capture in Flúorine below 1500 keV"*. Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics.Vol.7, p.1766.

[143] Macklin R.L., (1988), *"Neutron capture by 79 Br, 81 Br, and 75 As"*. Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol 99, p. 133.

[144] Majumder M.(1970).*"Capture Cross Section of 14 MeV Neutrons"*. Indian Journal of Physics; Vol.44, p.204

[145] Majumder M., (1970). *"Capture Cross Section of 14 MeV Neutrons"*. Journal: Indian Journal of Physics.

[146] Majumder Manjushree, B. Mitra, (1977). *"Capture cross section of 14 MeV neutrons".* Journal: Transactions of the Bose Research Inst.,Calcutta. Vol.40, Issue.3, p.81.

[147] Marion J.B. and Brugger R. M.. (1955). *"Neutron induced reactions in fluorine".*Physical review. The Rice Institute, Houston, Texas.

[148] Mariscotti M. A. J., W.Gelletly, W. R. Kane. (1971). *"Thermal neutron capture γ- raysfrom reaction Pb ^{207} (n, γ) Pb ^{208} "*. Physical review C.

[149] Martin H.C., 1954. *"Cross sections for the O16(n,p)N16 reaction from 12 to 18 MeV".* Journal: Physical Review. Vol.93, p.498

[150] McKlveen John W, (1981). *"Fast neutron activation analysis: Elemental data base".* Ann Arbor Science Publishers.

[151] Mcneill K.G., J.W. Jury, M.N. Thompson, B.L. Berman, R.E. Pywell, (1991). *"18O(G,PN + G,NP) cross sections"*. Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics.Vol.43, p.489.

[152] Meyers T., (1972). *"Longterm and peakscan: neutron activation analysis computer program."* Museum of Anthropology, University of Michigan.

[153] Miller Charles Everett , (1959). *"Neutron activation analysis methods for the Group VIII elements (ORNL)".* Oak Ridge National Laboratory.

[154] Miller Charles Everett , (1959). *"Neutron activation analysis methods for the Group VIII elements"*. Oak Ridge National Laboratory.

[155] Milligy G., I. Hunyadi , (1967). *"Radiative capture cross- sections for 3 MeV neutrons".* Journal: Journal of Nuclear Energy Vol.21, p.797.

[156] Mitra B., (1967). *"A survey of results of (n,p) cross sections of 14 MeV neutrons in low- Z nuclei"*. Journal: Nucl. and Solid State Physics Symp.

[157] Mitra B., A. M. Ghose, (1966). *"(n,p) cross sections of some low Z nuclei for 14.8 MeV". Journal:* Nuclear Physics.Vol.83, p.157.

[158] Moore Robert V, (1973).*"Neutron activation analysis of bottom sediments. National Environmental Research Center, Office of*

Research and Monitoring, U.S". Environmental Protection Agency, for sale by Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off.

[159] Moore Robert V, (1975). "*Comparison of germanium detectors for neutron activation analysis for mercury (Environmental protection technology series)".* National Environmental Research Center, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency; for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off.

[160] Moore Robert V, (1977). "*Nondestructive multielement instrumental neutron activation analysis".* Available through the National Technical Information Service.

[161] Morcos N.A., R.O.Barnes, J.De Melo, B.E.Lee, J.R.Van Hise, (1698). "*Gamma Rays from the 75As (n,gamma) 76As Reaction*" Journal: Physical Review. Vol 166, p.1068.

[162] Mosen A. W, (1960). "*A procedure for the determination of the rare-earth elements, lanthanum through lutetium, in chondritic, achondritic, and iron meteorites by neutron-activation analysis*". General Atomic.

[163] Mukherjee A., B. Dasmahapatra, (1997). "*Fusion cross sections for 7Li+11B and 9Be+9Be reactions at low energies".* Journal: Nuclear Physics, Section A. Vol.614, p.238.

[164] NASA, (1997). "*Lithological variation with depth and decoupling of maturity parameters in Apollo 16 regolith core 68001/2 (SuDoc NAS 1.26:207239)".* National Aeronautics and Space Administration National Technical Information Service, distributor.

[165] Needham G.A., F.P. Brady, D.H. Fitzgerald, J.L. Romero, J.L. Ullmann, J.W. Watson, C. Zanelli, (1982)."*Excitation of analog isovector giant resonances via the (n,p) reaction on 14-N and 16-O at 60 mev*". Journal: Nuclear Physics, Section A.Vol.385, p.349.

[166] Nelson R.O., M.B. Chadwick, A. Michaudon, P.G. Young, (2001). "*High-Resolution Measurements and Calculations of Photon-Production Cross Sections for 16O (n,x gamma) Reactions Induced by Neutrons with Energies between 4 and 200 MeV*". Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol.138, p.105.

[167] Ngoc P.N., S.Gueth, F.Deak, A.Kiss, (1980). "*Investigations of (n,p), (n,α) and (n,2n) reactions around 14 MeV*". Thesis of dissertation.

[168] Norman E.B., B. Sur, (1998) "*Cross sections for 17O (n,p)17N and 17O(n,d)16N reactions for 14 MeV*". Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol.57, p.2043.

[169] Nuclear Physics, Section A, (1981)."*Nuclear Physics, Section A".* Thesis of dissertation.

[170] O`rielly G.V., D. Zubanov, M.N. Thompson, (1989). "*Deexcitation G-rays following the photodisintegration of O-17*". Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol.40, p.59.

[171] Okumura S., (1967). "*Isomer pair cross sections by 13.4 – 15.0 MeV neutrons*". Journal: Nuclear Physics, Section A. vol 93, p. 74.

[172] Overwater R. M. W., (1994). "*The Physics of Big Sample Instrumental Neutron Activation Analysis (Delft Studies in Integrated Water Management , No 5)*".Delft Univ Pr.

[173] Paic G., I. Slaus, P. Tomas, (1964). "*O16(n,D)N15 GS and O16(n,p)N16 reactions at 14.4 MeV*" . Journal: Physics Letters. Vol.9, p.147.

[174] Parry Susan J., (1991). "*Activation Spectrometry in Chemical Analysis (Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications)".* Wiley-Interscience.

[175] Parry Susan J., (1991)."*Activation spectrometry in chemical analysis" .*John Wiley & Sons. Vol.119.

[176] Potts, P.J. (1987). "*A handbook of silicate rock analysis*". Blackie. Glasgow.

[177] Parry, S.J, (1991). "*Activation spectrometry in chemical analysis*". John Wiley and sons.

[178] Paul E.B., R.L. Clarke, (1953)."*Cross section measurements of reactions induced by neutrons of the 14.5 Mev energy*". Journal: Canadian Journal of Physics. Vol.31, p.265.

[179] Picard J., C.F. Williamson, (1965). "*The (n,p),(N,ALPHA) and (n,2n) cross sections for F-19 and NA-29 between 13 and 21 MeV".* Journal: Nuclear Physics. Vol.63, p.673.

[180] Pomerance H., (1951). "*Thermal neutron capture cross sections."* Journal: Physical Review. Vol 83, p. 641.

[181] Popov Y.P., Y.I.Fenin, (1962). "*Et Phys.Jetp 16, 1409 (163) Analysis of Averaged Cross Sectionsfor Neutron Capture* ". Journal: Zhurnal Eksperimental`noi i Teoret. Fiziki. Vol.43, p.2000.

[182] Prasad R., D. C. Sarkar, (1966). "*Measurement of (n,p) and (n,a) reaction cross sections at 14.8 MeV."* Journal: Measurement of (n,p) and (n,a) reaction cross sections at 14.8 MeV. Vol.85, p.476.

[183] Prasad R., D.C. Sarkar, (1971). "*Measured (n,p) reactions cross sections and their predicted values at 14.8 MeV* ". Journal: Nuovo Cimento A.

[184] Prasad R., D.C.Sarkar, (1971). "*Measured (n,p) reaction cross-sections and their predicted values at 14.8 Mev*". Journal Nuovo Cimento A; Vol.3, Issue.3, p.467.

[185] Progress Report, (1957). "*Oak Ridge National Lab. Reports*".

[186] Progress Report, (1964) and (1966). Ref:"*Atomic Energy Est. Trombay Reports*".

[187] Progress Report, (1966). Ref:"*Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC*".

[188] Progress Report, (1970). Ref: "*Report from misc. OECD Countries to EANDC".*

[189] Progress Report, (1971). Ref: "*Report from misc. OECD Countries to EANDC".*

[190] Qaim S.M., N.I.Molla. (1977). "*Nuclear data measurements for Fr-wall and structural materials*". Nuclear Physics, Section A; Vol.283, p.269.

[191] Qaim S.M., R. Woelfle, G. Stoecklin, (1971). "*Activation cross sections of fast neutron induced nuclear reactions. Precision measurements and systematic*", Conference: Chemical Nucl. Data Conf.,Canterbury. P. 121.

[192] Rakovicice Miloslav, (1983). "*New Approaches to the Neutron Activation Analysis in Biomedical Sciences (Acta Universitatis Carolinae. Medica, Monographia)".* Univ. Karlova.

[193] Rakovicie Miloslav, (1980). "*New [i.e. New] approaches to the neutron activation analysis in biomedical sciences".* Universita Karlova.

[194] Rama Prasad P., J. Rama Rao, E. Kondaiah, (1969). "*Reaction mechanisms in As 75 + N system*". Journal: Nuclear Physics, Section A. Vol.138, p.85.

[195] Rama Rao J., N.L. Singh, S. Singhal, A.V. Mohan Rao, S. Mukherjee, L. Chaturvedi, (1986). "*Simulation technique for the measurement of fast neutron reaction cross section*". Journal: Nucl. Instrum. Methods in Physics Res., Sect.B. Vol.17, p.368.

[196] Raman S., E. k. Warburton, J.W. Starner E.T. Jurne, and J.E. Lynn, P. Tikkanen and J.Keininen . (1996). "Spectroscopy of ^{20} F levels*".* Physical review. Part C Vol.53, p.616

[197] Rasmussen S. E, (1973)." *Neutron activation analysis of samples from the Kimberley Reef conglomerate (National Institute for Metallurgy. Report)"*. National Institute for Metallurgy

[198] Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC; (1965) No.57, p.18..

[199] Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC; (1966) No.66, p.42.

[200] Report from European-American Nucl. Data Committee. (1966) Documents; No.50, p.110.

[201] Richard Charles Ragaini, (1976). "*Neutron activation analysis at the Livermore Pool-Type reactor for the environmental research program".* Available from the National Technical Information Service.

[202] Rosen J.L., S.Desjardins, W.W.Havens, J.Rainwater, (1959). "*Radiation widths measured with the nevis slow neutron velocity selector"*. Journal: Bulletin of the American Physical Society. Vol. 4. p. 473.

[203] Rosenberg Rolf J, (1977). "*Instrumental neutron activation analysis as a routine method for rock analysis (Electrical and nuclear technology)".* Instrumental neutron activation analysis as a routine method for rock analysis (Electrical and nuclear technology).

[204] Ryves T.B., D.R.Perkins. (1971). "F*urther activation thermal neutron capture cross sections and resonance integrals*". Journal of Nuclear Energy; Vol.25, p.129.

[205] Salmon L, (1975). *"Instrumental neutron activation analysis in environmental studies of trace elements. United Kingdom Atomic Energy Authority".* Environmental and Medical Science Division.

[206] Sanchez M.L., J.L. Casanova, J. Casanova, (1974). *"Activation cross section of O-16,SI -28,NA-23,for 14.1+-0.3 MeV neutrons"*. Journal: Report from misc. OECD countries to NEANDC.

[207] Sarna-Wojcicki Andrei M, (1979*). "Chemical correlation of some late Cenozoic tuffs of northern and central California by neutron activation analysis of glass and comparison with X-ray fluorescence".* Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off.

[208] Sauvan E., F. Carstoiu, N.A. Orr, J.S. Winfield, M. Freer, J.C. Angelique, W.N. Catford, N.M. Clarke, N. Curtis, S. Grevy, C. LeBrun, M. Lewitowicz, E. Liegard, F.M. Marques, M. Mac-Cormick, P. Roussel-Chomaz, M.-G. Saint Laurent, M. Shawcross, (2001). *"One-neutron removal reactions on light neutron-rich nuclei".* Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics. Vol.69, p.044603

[209] Schantl W., (1970). *"No title given"*. Thesis of dissertation.

[210] Schmidt- Hoenow M. , W. Herr, (1972). *"Activation cross section of O-16(n,p)N-16 reaction for 14 MeV (D-T) neutrons"*. Journal: Radiochemical Act. Vol.17, p.142

[211] Seebeck U., M.Bormann. (1965). *"Energy and angular distributions of the alpha particles from 14.1 MeV Neutron Reactions in* Al^{27} *and* Ni^{58}*"*. Nuclear Physics; Vol.68, p.387.

[212] Seeman K.W., W.E. Moore, (1962). *"O16(n,p)N16 cross section from 12.6 to 16.3 MeV"*. Report: Knolls Atomic Power Lab. report series.

[213] Seren L., H.N. Friedlander, S.H. Turkel, (1947*). "Thermal Neutron Activation Cross Section* ". Journal: Physical Review. Vol. 72. p. 888.

[214] Seren L., H.N. Friedlander, S.H. Turkel, "L. Seren, H.N. Friedlander, S.H. Turkel". (1947). *"Without title"* Journal: Physical Review.

[215] Shalev S., (1974). *"Measurements on Delayed Neutrons from Fast Fission*." Journal: I.A.E.A. Research Contract Report. Nº.926.

[216] Sigg R.A., (1976). *"Fast neutron induced reaction cross-sections and their systematics".* Thesis of dissertation.

[217] Smith D. M., Norman A. Bostrom and Emmett L. Hudspeth.(1960). *"Excitation study of* $F^{10}(n,a)N^{10}$ *with a* BaF_2 *crystal".* Physical review.

[218] Smith D.L., J.W.Meadows, J.F.Whalen, (1981). *"Cross sections for F-19 (n,p)O-19 and F-19(N,alpha)N-16 from threshold to 9 MeV"*. Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol. 77. p. 256.

[219] Smith D.M., N.A.Bostrom, E.L.Hudspeth, (1958). *"Excitation study of F19 (N,ALPHA)N16 with a BA-F2 crystal."* Journal: Physical Review. Vol.117, p.514.

[220] Sokolowski E.K., R. Bladh, (1969). *"A determination of the 2200M/S absorption cross section and resonance integral of*

arsenic by pile oscillator techniques". Journal: Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm/ Studsvik Repts.No.351.

[221] Stamatelators I.E., K.Kasviki, S.Green, M.Gainey, J.Kalef-Ezra, A. *Beddoe.(2004.) "Prompt-gamma neutron activation analysis facility for in vivo body composition studies in small animals".* Anal ioanal Chem.

[222] Steinnes Eiliv, (1967). "*Determination of some lanthanide elements in apatites".* By instrumental neutron activation analysis, (KR-). Lillestr²m.

[223] Stokes Jeff, (1979). "*In-situ plutonium assay by the delayed fusion neutron technique: Preliminary feasibility tests using the IRT Â²µÂ² Cf-based uranium borehole logging system, final report. IRT".* Instrument Research Technology Corp.

[224] Subashi M. , E. Gueltekin, I. A. Reyhankan, Y. Oezbir, G. Tarcan, M. Shirin, M. N. Erduran, (2000). "*16O (n,p)16N Reaction Cross Section Around 14 MeV*". Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol.135, Issue.3, p.260.

[225] Subasi M., M. Bostan, M.N. Erduran, A. Durusoy, E. Gultekin, G. Tarcan, Y. Ozbir, (1996). "*Measurement of $^{50}Ti(n,a)^{47}Ca$ Reaction Cross Sections for 13.6- to 14.9-MeV Neutrons*". Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol.122, p.423.

[226] Tilley D.R., C. Cheves, J. Kelley, S. Raman, H. Weller. (1998). "*Energy levels of light nuclei, A = 20"*. Nuclear Physics A. Vol 636, p. 249.

[227] Thompson Theos Jardin, (1961). "*Neutron dosimetry, spectrometry, and neutron activation analysis: Final report (MITNE)".* M.I.T.

[228] Urdaniz María Corina. (2004)*."Activación neutrónica y vida media".* Laboratorio 5-FCEyN-UBA.

[229] Vagelatos Nicholas , (1978). "*Neutron formation temperature gauge and neutron activation analysis brine flow meter (IRT)*". By the Nat'l Technical Information Service.

[230] Van Der Linden R., F. De Corte, P. Van Den Winkel, J. Hoste, (1972)."*A compilation of infinite dilution resonance integrals, I ".* Journal: J. of Radioanalytical Chemistry. Vol 11, p. 133.

[231] Van Grieken R. , (1972*)." Annotated bibliography on 14 MeV neutron activation analysis (Series, bibliographies - Bureau Eurisotop)".* Bureau Eurisotop, Information and Documentation Section.

[232] Vandecasteele Carlo , (1972). "*The determination of oxygen in non-ferrous metals by 14 MEV neutron activation analysis"*. Eurisotop Office, Information and Documentation Service.

[233] Venugopala Rao P., R.E. Wood, J.M. Palms, R.W .Fink, (1971). "*Neutron Activation Cross Sections for As, Br, Rb and Sr Isotopes at 14.4 MeV"*. Journal: Physical Review, Part C, Nuclear Physics.

[234] Vinitskaya G.P., V.N.Levkovskiy, V.V.Sokol`skiy, I.V.Kazachevskiy, (1967). "*Cross sections of the (n,p) and (n,α) reactions at neutron energy 14.8 MeV"* . Journal Yadernaya Fizika; Vol.5, Issue.6, p.1175.

[235] Vladimirskii V.V., A.A.Panov, I.A.Radkevich, V.V.Sokolovskii, (1958). "*The fision cross section of U233 and the total effective cross sections of As, V, Ta and Bi".* Journal Atomnaya Energiya; Vol.5, p.69.

[236] Vlastou , C.T. Papadopoulos, C.T sabaris, P.A. Assimakopoulos, A.A. Pakou, G. Doukellis, C.A. Kalfas, A.C. Xenoulis, (2000). "*Fusion cross-section of the 7-Li + 11-B reaction".* Journal: European Physical Journal A: Hadrons and Nuclei. Vol.8, p.361.

[237] Vogg, Hubbert, (1971)." *Semiconductor gamma spectra for neutron activation analysis"*. Verlag Karl Thieming.

[238] Von Halban H. Jr, L. Kowarski, (1938). "*N, Gamma Cross Section Mesurement For Ceveral Elements*". Journal: Nature. Vol.142, p.392.

[239] Vuletin J., P. Kulisic, N. Cindro, (1970). "*Activation cross sections of (n, gamma) reactions at 14 MeV".* Journal: Lettere al Nuovo Ciment.Vol.10, p.1.

[240] Wagner M., H.Warhanek. (1980). "*Activation measurements of neutron capture cross sections at 14.6 mev and a critical survey of such data in the literature*". Acta Physica Austriaca; Vol.52, p.23.

[241] Waldman Jed M, (1994*). "Modeling near-field mobility of soil resuspension using tracer-seeding and neutron activation analysis techniques: Final report. New Jersey*". Dept. of Environmental Protection & Energy, Division of Science and Research.

[242] Walter G., (1984). "*Temperatur und neutronendichte der schwachen komponente des s-prozesses"*. Report: Kernforschungszentrum Karlsruhe Reports.

[243] Walter G., B. Leugers, F. Kappeler, Z.Y. Bao, G. Reffo, F. Fabbri, (1986). "*Kilo-Electron-Volt Neutron Capture Cross Sections of the Krypton Isotopes "*. Journal: Nuclear Science and Engineering. Vol 93, issue 4, p. 357.

[244] Wehr M.R., Richards, J.A., Adair III , T.W., (1978). "*Physics of the Atom",* 3rd Ed. Adison-Wesley.

[245] Weston L.W., K.K. Seth, E.G. Bilpuch, H.W. Newson, (1960). "*Neutron captur*e cross sections in the keV region. PART II. Spin-orbit coupling and the optical model". Journal: Annals of Physics. Vol. 10, p, 477.

[246] Westphal G.P, (1979) "*Instrumentos y métodos nucleares*" 163189-196

[247] Willem Baas Hendrik, (2004). "*Neutron Activation Analysis of Inhomogeneous Large Samples".* Delft Univ Pr; Illustrate edition.

[248] Wood D. E, (1967). "*Development of fast neutron activation analysis for liquid loop systems"*. Kaman Nuclear.

[249] Wood D. E, (1968). "*Some principles of activation analysis: A talk delivered to a Conference on Application of Neutron Activation Analysis in Industry-held at Michigan Technological."* Kaman Sciences Corp.

[250] Wu C.H., R.Woelfle, S.M.Qaim. (1979). "*Activation and mass spectrometric study of 3-He - particle emission in the interactions of fast neutrons with medium mass nuclei*". Nuclear Physics, Section A; Vol.329, p.63.

[251] Zupranska E., K. Rusek, J. Turkiewicz, P. Zupranski, (1980). "*Excitation functions for (n, A) reactions in the neutron energy range from 13 to MeV*". Journal: Acta Physica Polonica, Part B. Vol.11, p.853.

B. Páginas de interés consultadas

http://www.fem

http://www.femtosecondsystems.com/

http://www.missouri.edu/

http://www-nds.iaea.org/ngatlas2/atlas.htm

http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/adopted_searchi.jsp

http://www.sciner.com/

http://www.elementalanalysis.com/

http://ib.cnea.gov.ar/~protrad/docs/Licencia/Interacci%f3n.pdf

http://www.oepm.es

C. Patentes:

[1] Substance detection device using monoenergetic neutrons

Número de patente: W09741422

Fecha de publicación: 1997-11-06

Inventor: RANDERS-PEHRSON GERHARD; BRENNER DAVID J

Solicitante: RADIO PROGRAMMES CORP (US)

Clasificación:

-Internacional: *G01N23/04; G01N23/09; G01N33/22; G01V5/00;* G01N23/02; G01N33/22; G01V5/00**;** (IPC1-7): G01N23/02; G01N23/09; G01N23/10; G01N33/22

-Europea: G01N23/04; G01N23/09; G01N33/22; G01V5/00D

Número de solicitud: WO1997US07212 19970429

Número (s) de prioridad: US19960016578P 19960430

[2] Pulsed gamma neutron activation analysis (PGNAA) method and apparatus for nondestructive assay of containerized contaminants.

Número de patente: TW457493B

Fecha de publicación: 2001-10-01

Inventor: DULLOO ABDUL R (US); CONGEDO THOMAS V (US); RUDDY FRANCIS H (US); SEIDEL JOHN G (US); WILLIAM WOODWARD S (US)

Solicitante: WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP (US)

Clasificación:

-Internacional: G01N23/222; G01N23/22; (IPC1-7): G21G1/06; G21C17/003

-Europea: G01N23/222

Número de solicitud: TW20000114614 20000825

Número (s) de prioridad: US19990145479P 19990723

[3] Pulsed neutron elemental on-line material analyzer

Número de patente : WO0003237

Fecha de publicación: 2000-01-20

Inventor: VOURVOPOULOS GEORGE

Solicitante: NUMAT INC (US)

Clasificación:

-Internacional: *G01N23/09; G01N23/204; G01N23/222;* G01N23/02; G01N23/20; G01N23/22**;** (IPC1-7): G01N23/222

-Europea: G01N23/09; G01N23/204; G01N23/222

Número de solicitud: WO1999US15762 19990708

Número (s) de prioridad: US19980092194P 19980709; US19990273428 19990319

[4] Bulk material analyser for on-conveyor belt analysis

Número de patente: US6362477

Fecha de publicación: 2002-03-26

Inventor: SOWERBY BRIAN (AU); LIM CHERYL (AU); TICKNER JAMES (AU)

Solicitante: COMMW SCIENT IND RES ORG (AU)

Clasificación:

-Internacional: *G01N23/08; G01N23/225; G01N33/24;* G01N23/02; G01N23/22; G01N33/24; (IPC1-7): G01N23/222

-Europea: G01N23/08; G01N23/225C2; G01N33/24

Número de solicitud: US20000581160 20000714

Número (s) de prioridad: AU1997PP00830 19971210; WO1998AU01026 19981210

[5] Regulation of neutron energy for achieving sensitivity and uniformity in separate load material analysis.

Número de patente: JP10339708

Fecha de publicación: 1998-12-22

Inventor: HURWITZ MICHAEL J; PROCTOR RAYMOND J; YUSUF SIAKA

Solicitante: GAMMA METRICS

Clasificación:

-Internacional: *G01N23/04; G01N23/222; G01T1/167;* G01N23/02; G01N23/22; G01T1/00; (IPC1-7): G01N23/222; G01T1/167

-Europea: G01N23/04; G01N23/222

Número de solicitud: JP19980092278 19980319

Número (s) de prioridad: US19970822075 19970320

[6] Stainless steel having excellent thermal neutron absorption ability

Número de patente: CA2229002

Fecha de publicación: 1997-02-20

Inventor: KAJIMURA HARUHIKO (JP)

Solicitante: SUMITOMO METAL IND (JP)

Clasificación:

-Internacional: *C22C38/54; G21F1/08;* C22C38/54; G21F1/00; (IPC1-7): C22C38/54; C22C38/32; G21C13/087

-Europea: C21C3/06; C22C38/54; G21F1/08

Número de solicitud: CA19962229002 19960808

Número (s) de prioridad: JP19950203230 19950809; JP19950272164 19951020; WO1996JP02258 19960808

[7] Container for housing radioactive tank in which boron is mixedly included.

Número de patente: JP2001330698

Fecha de publicación: 2001-11-30

Inventor: YOSHINAGA YUKIO

Solicitante: YOSHINAGA YUKIO

Clasificación:

-Internacional: *G21F1/10; G21F3/00; G21F5/002; G21F5/005; G21F9/36;* G21F1/00; G21F3/00; G21F5/002; G21F5/005; G21F9/34; (IPC1-7): G21F9/36; G21F1/10; G21F3/00; G21F5/002; G21F5/005

-Europea:

Número de solicitud: JP20000188441 20000519

Número (s) de prioridad: JP20000188441 20000519

[8] Metal matrix compositions for neutron shielding applications

Número de patente: WO9800258

Fecha de publicación: 1998-01-08

Inventor: CARDEN ROBIN A

Solicitante: ALYN CORP (US)

Clasificación:

-Internacional: *G21C7/24; C22C1/05; C22C1/10; C22C32/00; G21F1/08; G21F3/00;* G21C7/06; C22C1/05; C22C1/10; C22C32/00; G21F1/00; G21F3/00; (IPC1-7): B22F3/10; B22F5/00

-Europea: C22C32/00D2B; G21F1/08

Número de solicitud: WO19 US19960674209 1996070197US09360 19970521

Número (s) de prioridad: US19960674209 19960701

[9] Cask for a radioactive material and radiation shield

Número de patente: US5887042

Fecha de publicación: 1999-03-23

Inventor: AKAMATSU HIROSHI (JP); TANIUCHI HIROAKI (JP)

Solicitante: KOBE STEEL LTD (JP)

Clasificación:

-Internacional: *G21F1/08; G21F5/00; G21F5/002; G21F5/005; G21F5/008; G21F9/36;* G21F1/00; G21F5/00; G21F5/002; G21F5/005; G21F5/008; G21F9/34; (IPC1-7): G21C19/07; G21F1/08

-Europea: G21F1/08B; G21F5/00

Número de solicitud: US19970899650 19970724

Número (s) de prioridad: JP19960196263 19960725.

ANEXOS.

Anexo: Relación de archivos de datos tomados en el laboratorio.

ACTIVADOS			
ARCHIVO		TIEMPO	OBSERVACIONES
{1}	DA1	Activación:2min/Lectura:180s	-
{2}	DA2	Activación:2min/Lectura:180s	-
{3}	A2	Activación:2min/Lectura:180s	-
{4}	A4	Activación:2min/Lectura:180s	-
{5}	S10	Activación:2min/Lectura:30s	14 baldosas
{6}	S20	Activación:2min/Lectura:25s	14 baldosas
{7}	S21	Activación:2min/Lectura:25s	14 baldosas
{8}	S22	Activación:2min/Lectura:25s	14 baldosas
{9}	M03	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{10}	M06	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{11}	M09	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{12}	M12	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{13}	M15	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{14}	M18	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{15}	M21	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{16}	M24	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{17}	M30	Activación:2min/Lectura:180s	7A
{18}	I02	Activación:2min/Lectura:25s	-
{19}	I04	Activación:2min/Lectura:25s	-
{20}	I06	Activación:2min/Lectura:25s	-
{21}	I08	Activación:2min/Lectura:25s	-
{22}	I10	Activación:2min/Lectura:25s	-
{23}	I12	Activación:2min/Lectura:25s	-
{24}	I14	Activación:2min/Lectura:25s	-
{25}	I16	Activación:2min/Lectura:25s	-
{26}	J04	Activación:2min/Lectura:25s	Fondo abierto contacto lateral Muestra concentrada
{27}	J06	Activación:2min/Lectura:25s	Fondo abierto contacto lateral Muestra concentrada
{28}	J08	Activación:2min/Lectura:25s	Contacto inferior Muestra concentrada
{29}	J10	Activación:2min/Lectura:25s	Repetido J08
{30}	J12	Activación:2min/Lectura:25s	Repetido J08
{31}	J13	Activación:2min/Lectura:25s	Repetido J12 Mayor tiempo de activación
{32}	J15	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:36.75%
{33}	5B01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:74.33
{34}	6B01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:27.85
{35}	7B01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:61.83
{36}	1A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:4.20
{37}	2B01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:87.02
{38}	3B01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:4.20
{39}	4B01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:97.20
{40}	5B02	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:74.33
{41}	2A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:27.85
{42}	3A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:36.75
{43}	1B100	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:36.75 100g
{44}	1Bcincuen	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:36.75
{45}	4A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:50g
{46}	5A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:61.83
{47}	6A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:74.33
{48}	7A01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:87.02
{49}	7Acomp	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:97.20
{50}	7Amin	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20 Compactada
{51}	7A45	Activación:45s/Lectura:25s	Ley:97.20
{52}	7A50	Activación:50s/Lectura:25s	Ley:97.20
{53}	4B60	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20
{54}	Con100	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20 100g
{55}	Con150	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 150g h=2.7cm
{56}	Con200	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20%

ACTIVADOS		
ARCHIVO	TIEMPO	OBSERVACIONES
		200g h =3.8 cm
{57} Con250	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 250g h =4.2cm
{58} Con300	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 300g h =6cm
{59} Con350	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 350g h =7cm
{60} Con400	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 400g h =7cm
{61} Con450	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 450g h =8cm
{62} Con500	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 500g h =8.5cm
{63} Con500_2	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 500g h =8.5cm
{64} Con550	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 550g h =9cm
{65} Con600	Activación:1min/Lectura:25s	Ley:97.20% 600g
{66} 1AA01	Activación:1min/ Lectura:25s	Muestra:1A
{67} 2AA02	Activación:1min/ Lectura:25s	Muestra:2A
{68} 3AA02	Activación:1min/ Lectura:25s	Muestra:3A
{69} 1BB01	Activación:1min/ Lectura:25s	Muestra:1B
{70} 1CC01	Activación:1min/ Lectura:25s	Muestra:1C
{71} 1DD02	Activación:1min/ Lectura:25s	Muestra:1D
{72} N1D01	Activación:2min/ Lectura:25s	Muestra:1D Peso:282.5g
{73} N1D	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra:1D Peso:282.5g
{74} N1A	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:3.48 Peso: 257.1g
{75} N1B	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:3.53 Peso:269.9g
{76} N1C	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:3.53 Peso:254.6g
{77} N1E	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:4.54 Peso:277.1g
{78} N2A	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:33.2 Peso:181.6g
{79} N3A	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:33.2 Peso:205.7g
{80} N2B	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:16.2 Peso:223.9g
{81} N2C	Activación:2min/ Lectura:25s	Ley:15.93 Peso:266.7g
{82} N2D	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:17.93 Peso:232.9
{83} N3B	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:36.07 Peso:190.4
{84} N3C	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:36.59 Peso:139.8g
{85} N3D	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:37.64 Peso:230.6
{86} N4A	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:70.11 Peso:300.85
{87} S3	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:10.86
{88} S1	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:2.36

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
{89} S7S	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:54.06 Muestra seca
{90} S7	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:54.06 Muestra húmeda
{91} 8	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:74.3
{92} 9	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:74.3
{93} PIE	Activación:2min/Lectura:25s	Piedra sin moler
{94} 4C01	Activación:2min/Lectura:25s	Ley:31.3 Peso:337.2
{95} 3C01	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra:3E Ley:39.47 Peso:177.3
{96} 2A01	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra:2ª Ley:33.2 Peso:181.6
{97} Piedra02	Activación:2min/Lectura:25s	Piedra sin moler
{98} Piedra03	Activación:2min/Lectura:25s	Piedra sin moler
{99} Piedra04	Activación:2min/Lectura:25s	Piedra sin moler
{100} Piedra05	Activación:2min/Lectura:25s	Piedra sin moler
{101} S7S01	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra: S7S Ley:54.06 Muestra seca
{102} S7S02	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra: S7S Ley:54.06 Muestra seca
{103} S702	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra: S7S Ley:54.06 Muestra húmeda
{104} S703	Activación:2min/Lectura:25s	Muestra: S7S Ley:54.06 Muestra húmeda
{105} Estrat1	Activación:2min/Lectura:25s	-
{106} Z01	Activación:2min/Lectura:25s	-
{107} Estrat2	Activación:2min/Lectura:25s	-
{108} Homog 1	Activación:2min/Lectura:25s	-
{109} Estrat3	Activación:2min/Lectura:25s	-
{110} Y01	Activación:2min/Lectura:25s	-
{111} Estrat4	Activación:2min/Lectura:25s	-
{112} Estrat5	Activación:2min/Lectura:25s	-
{113} Homog5	Activación:2min/Lectura:25s	-
{114} g1a501	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:50 g
{115} g1a502	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:50 g
{116} g1a503	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:50 g
{117} g1a1001	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:100 g
{118} g1a1002	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:100 g
{119} g1a1003	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:100 g
{120} g1a1501	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:150 g
{121} g1a1502	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:150 g
{122} g1a1503	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20%

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
		Peso:150 g
{123} g1a2001	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:200 g
{124} g1a2002	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:200 g
{125} g1a2003	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:200 g
{126} g1a2501	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:250 g
{127} g1a2502	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:250 g
{128} g1a2503	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:250 g
{129} g1a2504	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:250 g
{130} g1a3001	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:300 g
{131} g1a3002	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:300 g
{132} g1a3003	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:300 g
{133} g1a3004	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:300 g
{134} g1a3501	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:350 g
{135} g1a3502	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:350 g
{136} g1a3503	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:350 g
{137} g1a3504	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso:350 g
{138} g1a4001	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{139} g1a4002	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{140} g1a4003	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{141} g1a4004	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{142} g1a4501	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 450 g
{143} g1a4502	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 450 g
{144} g1a4503	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20%

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
		Peso: 450 g
{145} g1a4504	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 450 g
{146} g1a4505	Activación:2min	Muestra: g1a Ley: 4.20% Peso: 450 g
{147} g2a501	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 50g
{148} g2a502	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 50 g
{149} g2a503	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 50 g
{150} g2a504	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 50 g
{151} g2a1001	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 100 g
{152} g2a1002	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 100 g
{153} g2a1003	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 100 g
{154} g2a1501	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 150 g
{155} g2a1502	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 150 g
{156} g2a1503	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 150 g
{157} g2a2001	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{158} g2a2002	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{159} g2a2003	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{160} g2a2501	Activada toda la noche	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 250 g
{161} g2a2502	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 250 g
{162} g2a2503	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 250 g
{163} g2a3001	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 300g
{164} g2a3002	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 300g
{165} g2a3003	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 300g
{166} g2a3004	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20%

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
		Peso: 300g
{167} g2a3501	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{168} g2a3502	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{169} g2a3503	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{170} g2a3504	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{171} g2a4001	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 400g
{172} g2a4002	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 400g
{173} g2a4003	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 400g
{174} g2a4004	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 400g
{175} g2a4501	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 450g
{176} g2a4502	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 450g
{177} g2a4503	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 450g
{178} g2a4504	Activación:2min	Muestra: g2a Ley: 4.20% Peso: 450g
{179} g3a501	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 50g
{180} g3a502	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 50g
{181} g3a503	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 50g
{182} g3a504	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 50g
{183} g3a1001	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 100g
{184} g3a1002	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 100g
{185} g3a1003	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 100g
{186} g3a1501	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 150 g
{187} g3a1502	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 150 g
{188} g3a1503	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20%

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
		Peso: 150 g
{189} g3a1504	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 150 g
{190} g3a2001	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{191} g3a2002	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{192} g3a2003	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{193} g3a2004	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 200 g
{194} g3a2501	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 250 g
{195} g3a2502	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 250 g
{196} g3a2503	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 250 g
{197} g3a2504	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 300 g
{198} g3a3001	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 300 g
{199} g3a3002	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 300 g
{200} g3a3003	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 300 g
{201} g3a3004	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 300 g
{202} g3a3501	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{203} g3a3502	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{204} g3a3503	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{205} g3a3504	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 350 g
{206} g3a4001	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{207} g3a4002	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{208} g3a4003	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{209} g3a4004	Activación:2min	Muestra: g3a Ley: 4.20% Peso: 400 g
{210} gra3031	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53%

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
		Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{211} gra3032	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{212} gra3033	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{213} gra3034	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{214} gra3035	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{215} gra3036	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{216} gra3037	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{217} gra3038	Activación:2min	Muestra: gra Ley: 33.53% Peso: 303,659 g 1.25 % de agua
{218} grb3461	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{219} grb3462	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{220} grb3463	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{221} grb3464	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{222} grb3465	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{223} grb3466	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{224} grb3467	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{225} grb3468	Activación:2min	Muestra: grb Ley: 33.53% Peso:346,36 g Muestra seca
{226} grc3671	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
{227} grc3672	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{228} grc3673	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{229} grc3674	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{230} grc3675	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{231} grc3676	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{232} grc3677	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{233} grc3678	Activación:2min	Muestra: grc Peso:367,83 g Entrada molino+ Molino cilíndrico
{234} grd2971	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{235} grd2972	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{236} grd2973	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{237} grd2974	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{238} grd2975	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{239} grd2976	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{240} grd2977	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{241} grd2978	Activación:2min	Muestra: grd Peso:297,895 g Entrada molino+ Molino viejo
{242} gre3071	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{243} gre3072	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
		Entrada molinos nuevos
{244} gre3073	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{245} gre3074	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{246} gre3075	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{247} gre3076	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{248} gre3077	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{249} gre3078	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{250} gre3079	Activación:2min	Muestra: gre Peso:307,550g Entrada molino+ Entrada molinos nuevos
{251} Fondo b1	Activación:2min	
{252} Fondo b2	Activación:2min	
{253} Fondo b3	Activación:2min	
{254} g5a501	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:50 g
{255} g5a502	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:50 g
{256} g5a503	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:50 g
{257} g5a504	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:50 g
{258} g5a1001	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:100 g
{259} g5a1002	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:100 g
{260} g5a1003	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:100 g
{261} g5a1004	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:100 g
{262} g5a1501	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:150 g
{263} g5a1502	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:150 g
{264} g5a1503	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:150 g
{265} g5a1504	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:150 g
{266} g5a2001	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:200 g
{267} g5a2002	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:200 g
{268} g5a2003	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:200 g
{269} g5a2004	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:200 g
{270} g5a2501	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:250 g

ACTIVADOS		
ARCHIVO	**TIEMPO**	**OBSERVACIONES**
{271} g5a2502	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:250 g
{272} g5a2503	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:250 g
{273} g5a2504	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:250 g
{274} g5a3001	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:300 g
{275} g5a3002	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:300 g
{276} g5a3003	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:300 g
{277} g5a3501	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:350 g
{278} g5a3502	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:350 g
{279} g5a3503	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:350 g
{280} g5a4001	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:400 g
{281} g5a4002	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:400 g
{282} g5a4003	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:400 g
{283} g5a4004	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:400 g
{284} g5a4501	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:450 g
{285} g5a4502	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:450 g
{286} g5a4503	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:450 g
{287} g5a4504	Activación:2min	Muestra: g5a Peso:450 g

FONDOS			
FECHA	**ARCHIVO**	**TIEMPO DE LECTURA (segundos)**	**OBSERVACIONES**
10-7-2005	{288} D01	180	1 baldosa
10-7-2005	{289} D02	180	2 baldosas
10-7-2005	{290} D03	180	3 baldosas
10-7-2005	{291} D04	180	4 baldosas
10-7-2005	{292} D05	180	5 baldosas
10-7-2005	{293} D06	180	6 baldosas
10-7-2005	{294} D07	180	7 baldosas
10-7-2005	{295} D08	180	8 baldosas
10-7-2005	{296} D09	180	9 baldosas
10-7-2005	{297} D10	180	10 baldosas
10-7-2005	{298} D11	180	11 baldosas
10-7-2005	{299} D12	180	12 baldosas
10-7-2005	{300} D13	180	13 baldosas
10-7-2005	{301} D14	180	14 baldosas
10-7-2005	{302} D15	180	15 baldosas
11-7-2005	{303} M01	180	S in muestra 1ª Posición
11-7-2005	{304} M02	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{305} M04	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{306} M05	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{307} M07	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{308} M08	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{309} M10	180	Sin muestra
11-7-2005	{310} M11	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{311} M13	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{312} M14	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{313} M16	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{314} M17	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{315} M19	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{316} M20	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{317} M22	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{318} M23	180	4 b
11-7-2005	{319} M25	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{320} M26	180	4 b 1ª Posición
11-7-2005	{321} M28	180	Sin muestra 1ª Posición
11-7-2005	{322} M29	180	4 b 1ª Posición
12-7-2005	{323} A1	180	14 baldosas
12-7-2005	{324} A3	180	14 baldosas
12-7-2005	{325} S01	30	14 baldosas
12-7-2005	{326} S02	30	14 baldosas
12-7-2005	{327} S03	30	14 baldosas
12-7-2005	{328} S04	30	14 baldosas
12-7-2005	{329} S05	30	14 baldosas
12-7-2005	{330} S06	30	14 baldosas
12-7-2005	{331} S07	30	14 baldosas

FONDOS			
FECHA	**ARCHIVO**	**TIEMPO DE LECTURA (segundos)**	**OBSERVACIONES**
12-7-2005	{332} S08	30	14 baldosas
12-7-2005	{333} S09	30	14 baldosas
12-7-2005	{334} S11	25	14 baldosas
12-7-2005	{335} S12	25	14 baldosas
12-7-2005	{336} S13	25	14 baldosas
12-7-2005	{337} S14	25	14 baldosas
12-7-2005	{338} S15	25	14 baldosas
12-7-2005	{339} S16	25	14 baldosas
12-7-2005	{340} S17	25	14 baldosas
12-7-2005	{341} S18	25	14 baldosas
12-7-2005	{342} S19	25	14 baldosas 1ª Posición
12-7-2005	{343} Fondo S3	25	-
12-7-2005	{344} Fondo S1	25	-
12-7-2005	{345} Fondo S7S	25	-
12-7-2005	{346} Fondo S7	25	-
13-7-2005	{347} I01	25	-
13-7-2005	{348} I03	25	-
13-7-2005	{349} I05	25	-
13-7-2005	{350} I07	25	7 baldosas + manta
13-7-2005	{351} I09	25	7 baldosas + manta
13-7-2005	{352} I11	25	7 baldosas + manta
13-7-2005	{353} I13	25	7 baldosas + manta
13-7-2005	{354} I15	25	7 baldosas + manta
14-7-2005	{355} F01	25	Posición 3
14-7-2005	{356} F02	25	Posición 2
14-7-2005	{357} F03	25	Posición3 + manta
14-7-2005	{358} F04	25	Posición 3 + manta
14-7-2005	{359} F05	25	6 baldosas
14-7-2005	{360} F06	25	6 baldosas + batería de plomo
14-7-2005	{361} F07	25	Batería de 10 cm
14-7-2005	{362} F08	25	-
14-7-2005	{363} F09	25	-
14-7-2005	{364} F10	25	Batería de plomo
14-7-2005	{365} F11	25	Batería de plomo
14-7-2005	{366} F12	25	Batería de plomo
14-7-2005	{367} F13	25	F10 repetido
14-7-2005	{368} F14	25	7 baldosas + batería a 10 cm
14-7-2005	{369} F15	25	7 baldosas + batería a 10 cm
14-7-2005	{370} F16	25	7 baldosas + manta
15-7-2005	{371} J01	25	1 baldosa
15-7-2005	{372} J02	25	2 baldosas
15-7-2005	{373} J03	25	Fondo abierto contacto lateral
15-7-2005	{374} J05	25	Fondo abierto contacto lateral
15-7-2005	{375} J07	25	Contacto inferior
15-7-2005	{376} J09	25	Repetido J07
15-7-2005	{377} J11	25	Repetido J07 + J09
15-7-2005	{378} J14	25	Repetido J07 + J09 + J11
13-12-2005	{379} Fondo 12	25	-
13-12-2005	{380} Fondo 13	25	-
13-12-2005	{381} Fondo 14	25	-
30-12-2005	{382} Fondo 12	25	-
30-12-2005	{383} Fondo13	25	-
30-12-2005	{384} Fondo 14	25	-
4-1-2006	{385} 1Afondo	25	-
4-1-2006	{386} 2Afondo	25	2A
4-1-2006	{387} 3AAfondo	25	-
4-1-2006	{388} 1BBfondo	25	-
4-1-2006	{389} 1CCfondo	25	-
4-1-2006	{390} 1DD01	25	-
4-1-2006	{391} Fondo N1D	25	-

FONDOS			
FECHA	ARCHIVO	TIEMPO DE LECTURA (segundos)	OBSERVACIONES
4-1-2006	{392} Fondo N1A	25	-
4-1-2006	{393} Fondo N1B	25	-
4-1-2006	{394} Fondo N1C	25	-
4-1-2006	{395} Fondo N1E	25	-
4-1-2006	{396} Fondo N2A	25	-
4-1-2006	{397} Fondo N3A	25	-
4-1-2006	{398} Fondo N2B	25	-
4-1-2006	{399} Fondo N2C	25	-
4-1-2006	{400} Fondo N2D	25	-
4-1-2006	{401} Fondo N3B	25	-
4-1-2006	{402} Fondo N3C	25	-
4-1-2006	{403} Fondo N3E	25	-
4-1-2006	{404} Fondo N4A	25	-
4-1-2006	{405} Fondo N4C	25	-
4-1-2006	{406} Fondo 8	25	-
4-1-2006	{407} Fondo 9	25	-
4-1-2006	{408} Fondo PIE	25	-
4-1-2006	{409} Fondo 4C	25	-
4-1-2006	{410} Fondo 3C	25	-
4-1-2006	{411} Fondo 2A	25	-
4-1-2006	{412} 2Fondo PIE	25	-
4-1-2006	{413} FondoN3D	25	-
31-3-2006	{414} Fondo 316	25	-
30-3-2006	{415} Fondo 311	25	-
30-3-2006	{416} Fondo 312	25	-
30-3-2006	{417} Fondo 313	25	-
31-3-2006	{418} Fondo 314	25	-
31-3-2006	{419} Fondo 315	25	-
31-3-2006	{420} Fondo 317	25	-
31-3-2006	{421} Fondo 318	25	-
31-3-2006	{422} Fondo 319	25	-
31-3-2006	{423} Fond 3110	25	-
31-3-2006	{424} Fond 3111	25	-
31-3-2006	{425} Fond 3112	25	-
31-3-2006	{426} Fondob1	25	-
31-3-2006	{427} Fondob2	25	-
31-3-2006	{428} Fondob3	25	-
31-3-2006	{429} Fondoa1	25	-

Tabla 275. Relación de archivos de espectros.

Anexo: Patente solicitada.

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

Oficina Española de Patentes y Marcas

INSTANCIA DE SOLICITUD

NUMERO DE SOLICITUD: P 2006 0119 9

DELEG. GOBIERNO EN ASTURIAS VENTANILLA ÚNICA 16332000013777 03/05/2006 10:21:24 OVIEDO

FECHA Y HORA DE PRESENTACIÓN EN LA O.E.P.M.

FECHA Y HORA PRESENTACIÓN EN LUGAR DISTINTO O.E.P.M.

(1) MODALIDAD:
☒ PATENTE DE INVENCIÓN ☐ MODELO DE UTILIDAD

(2) TIPO DE SOLICITUD:
☐ ADICIÓN A LA PATENTE
☐ SOLICITUD DIVISIONAL
☐ CAMBIO DE MODALIDAD
☐ TRANSFORMACIÓN SOLICITUD PATENTE EUROPEA
☐ PCT: ENTRADA FASE NACIONAL

(3) EXP. PRINCIPAL O DE ORIGEN:
MODALIDAD
Nº SOLICITUD
FECHA SOLICITUD

(4) LUGAR DE PRESENTACIÓN: CÓDIGO

(5) SOLICITANTE (S): APELLIDOS O DENOMINACIÓN SOCIAL	NOMBRE	NACIONALIDAD	CÓDIGO PAÍS	DNI/CIF	CNAE	PYME
Universidad de Oviedo		**Española**	**ES**	**Q-3318001-I**		**5**

(6) DATOS DEL PRIMER SOLICITANTE:
DOMICILIO **OTRI. Edif. Científico-Técnico. Campus El Cristo.**
LOCALIDAD **Oviedo**
PROVINCIA **Asturias**
PAÍS RESIDENCIA **España**
NACIONALIDAD **España**
TELÉFONO **985 10 27 62**
FAX **985 10 35 02**
CORREO ELECTRÓNICO **otri@uniovi.es**
CÓDIGO POSTAL **33006**
CÓDIGO PAÍS **ES**
CÓDIGO PAÍS **ES**

(7) INVENTOR (ES): APELLIDOS	NOMBRE	NACIONALIDAD	CÓDIGO PAÍS
1.- Alonso Sánchez	**Teresa**	**Española**	**ES**
2.- Rey Ronco	**Miguel Ángel**	**Española**	**ES**

(8)
☐ EL SOLICITANTE ES EL INVENTOR
☒ EL SOLICITANTE NO ES EL INVENTOR O ÚNICO INVENTOR

(9) MODO DE OBTENCIÓN DEL DERECHO:
☒ INVENC. LABORAL ☐ CONTRATO ☐ SUCESIÓN

(10) TÍTULO DE LA INVENCIÓN:

MÉTODO Y APARATO PARA ANÁLISIS DEL FLÚOR, A PARTIR DE MUESTRAS MINERALES O COMPUESTOS DE FLÚOR, POR EL MÉTODO DE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA.

(11) EFECTUADO DEPÓSITO DE MATERIA BIOLÓGICA: ☐ SI ☒ NO

(12) EXPOSICIONES OFICIALES: LUGAR FECHA

(13) DECLARACIONES DE PRIORIDAD: PAÍS DE ORIGEN	CÓDIGO PAÍS	NUMERO	FECHA

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS 10 MAYO 2006 RECIBIDO

(14) EL SOLICITANTE SE ACOGE AL APLAZAMIENTO DE PAGO DE TASAS PREVISTO EN EL ART. 162 LEY 11/86 DE PATENTES ☐

(15) AGENTE /REPRESENTANTANTE: NOMBRE Y DIECCIÓN POSTAL COMPLETA. (SI AGENTE P.I., NOMBRE Y CÓDIGO) (RELLENESE, ÚNICAMENTE POR PROFESIONALES)

El Vicerrector de Investigación y Relaciones con la Empresa

(16) RELACIÓN DE DOCUMENTOS QUE SE ACOMPAÑAN:
☒ DESCRIPCIÓN Nº DE PÁGINAS: **15**
☒ Nº DE REIVINDICACIONES: **38**
☒ DIBUJOS. Nº DE PÁGINAS: **3**
☐ LISTA DE SECUENCIAS Nº DE PÁGINAS:
☒ RESUMEN
☐ DOCUMENTO DE PRIORIDAD
☐ TRADUCCIÓN DEL DOCUMENTO DE PRIORIDAD
☐ DOCUMENTO DE REPRESENTACIÓN
☐ JUSTIFICANTE DEL PAGO DE TASA DE SOLICITUD
☐ HOJA DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA
☐ PRUEBAS DE LOS DIBUJOS
☐ CUESTIONARIO DE PROSPECCIÓN
☐ OTROS:

FIRMA DEL SOLICITANTE O REPRESENTANTE
(VER COMUNICACIÓN)

FIRMA DEL FUNCIONARIO

NOTIFICACIÓN SOBRE LA TASA DE CONCESIÓN:
Se le notifica que esta solicitud se considerará retirada si no procede al pago de la tasa de concesión; para el pago de esta tasa dispone de tres meses a contar desde la publicación del anuncio de la concesión en el BOPI, más los diez días que establece el art. 81 del R.D. 2245/1986.

ILMA. SRA. DIRECTORA DE LA OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
informacion@oepm.es
www.oepm.es

C/ PANAMÁ, 1 • 28071 MADRID

MOD. 3101I – 2 – EJEMPLAR PARA EL SOLICITANTE

NO CUMPLIMENTAR LOS RECUADROS ENMARCADOS EN ROJO

ANEXO. PATENTE SOLICITADA.

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

Oficina Española de Patentes y Marcas

NÚMERO DE SOLICITUD

P 200601199

FECHA DE PRESENTACIÓN

RESUMEN Y GRÁFICO

RESUMEN (Máx. 150 palabras)

Método y aparato para análisis del flúor, a partir de muestras minerales o compuestos de flúor, por el método de activación neutrónica. El aparato está formado por una fuente de neutrones, un detector de radiación gamma y un sistema que permite introducir y desplazar una muestra por su interior. El método de análisis describe tanto el procedimiento de uso hasta obtener unas lecturas de la radiación emitida por la muestra, después de haber sido irradiada con los neutrones, como el método de cálculo que permite obtener las leyes en flúor a partir de las lecturas después de la realización de una calibración con muestras de ley conocida. Se aplica al sector de la minería y, en concreto, a la extracción, tratamiento, manipulación de minerales y compuestos de flúor.

GRÁFICO

Mod. 3103i

(VER INFORMACIÓN)

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

Oficina Española
de Patentes y Marcas

Titular: UNIVERSIDAD DE OVIEDO

OTRI. EDIF. CIENTIFICO-TECNICO. CAMPUS EL CRISTO.

OVIEDO
OVIEDO
33006
ESPAÑA

ASUNTO: Admisión a trámite de la solicitud de patente Nº P200601199 /5

Nos complace comunicarle que su solicitud de patente ha sido admitida a trámite con asignación de una fecha de presentación correspondiente al día 03/05/2006

De acuerdo con el artículo 59.2 de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes, a partir de la fecha antes mencionada usted podría gozar de una protección provisional frente a cualquier tercero que hubiera llevado a cabo una utilización de la invención siempre y cuando notifique a dicho tercero la presentación y el contenido de esta solicitud. Esta protección implicaría el derecho a exigir una indemnización razonable si dicho tercero prosiguiera utilizando su invención entre la fecha de la notificación y la fecha de publicación de la mención en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial de que la patente ha sido concedida. El citado derecho existiría a partir de la fecha de notificación fehaciente y se ejercería una vez se publique la mención de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial.

Por otra parte, transcurridos dieciocho meses desde la fecha de presentación de la solicitud o desde la fecha de prioridad , una vez superado el examen de formalidades y realizada la petición del informe sobre el estado de la técnica, la OEPM realizará la publicación de su solicitud. Esta publicación le confiere también, de acuerdo con el artículo 59.1 de la Ley de Patentes, una protección provisional en los términos mencionados en el párrafo anterior si cualquier tercero prosiguiera utilizando o comenzara a utilizar su invención entre la fecha de publicación de la solicitud y la fecha de publicación en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial de la mención de que la patente ha sido concedida. El citado derecho existiría a partir de la fecha de publicación de la solicitud -sin necesidad en este caso de notificación a terceros- y se ejercería una vez se publique la mención de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial.

Transcurridos 20 meses desde la fecha de su solicitud, no le hubiera llegado información alguna sobre la misma, podrá ponerse en contacto con esta Oficina Española de Patentes y Marcas llamando al teléfono de información número 902 157 530 (En horario de 9:00 a 14:30, de lunes a viernes) e indicando su deseo de conocer la situación administrativa de su expediente.

La Oficina Española de Patentes y Marcas le remitirá cumplida información de las diferentes etapas del procedimiento de concesión con indicación de los actos a llevar a cabo, los plazos para cumplimentarlos y las fechas a partir de las cuales dichos plazos comienzan a contar.

Asimismo, una vez publicada la solicitud de patente, podrá seguir la situación de su expediente a través de la página web www.oepm.es en Consulta de Expedientes, eligiendo la modalidad Patente Nacional e introduciendo en la casilla Número la referencia 200601199

EL DEPARTAMENTO DE PATENTES E INFORMACIÓN TECNOLÓGICA

Información@oepm.es
www.oepm.es
MOD. 3301

C/. PANAMÁ, I
28071 MADRID
TEL.: 91 349 53 00
FAX: 91 349 55 97

Patente.

MÉTODO Y APARATO PARA ANÁLISIS DEL FLÚOR, A PARTIR DE MUESTRAS MINERALES O COMPUESTOS DE FLÚOR, POR EL MÉTODO DE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA.

Este invento se refiere a un método y un aparato para determinar el contenido en flúor en una muestra de mineral o compuesto de flúor, utilizando una fuente de neutrones y un detector de radiación gamma.

La patente se encuadra en el sector del campo de aplicación de la industria minera de extracción, preparación y tratamiento o manipulación de minerales o compuestos de flúor, donde se precisa conocer con rapidez y exactitud los contenidos de flúor con distintas finalidades. Un ejemplo de aplicación se tiene en las plantas de concentrado donde permite realizar análisis casi instantáneos de flúor en distintos puntos de la planta e integrarse en el sistema de control del proceso.

El sector de técnica es el de los métodos de análisis elemental de flúor, más concretamente en lo relativo al método de análisis por activación neutrónica de Rayos Gamma diferidos, en el que se registran los rayos gamma diferidos producidos después de la irradiación de una muestra por medio de una fuente de neutrones.

ESTADO DE LA TÉCNICA

Se empieza exponiendo los principios científicos en los que se basa la activación neutrónica como método de análisis elemental. Posteriormente se expondrán las características de las reacciones de los neutrones con el flúor y, finalmente, se enunciarán brevemente otros métodos actualmente utilizados para analizar minerales y compuestos de flúor que no están basados en los mismos principios.

Desde que Henri Becquerel descubrió en el 1896 la radiactividad hasta la actualidad, se han encontrado muchas aplicaciones para la misma, entre ellas el análisis de ciertos elementos.

Cuando un átomo de un elemento absorbe un neutrón, incrementa el peso atómico sin cambiar las propiedades químicas del átomo, formando así un nuevo isótopo del elemento.

En este proceso el átomo emite una radiación, de cuyo análisis podemos obtener información sobre la cantidad y el tipo de elemento considerado.

Por otra parte, el nuevo isótopo puede resultar inestable y, en este caso, emitirá una o más clases de radiación durante un cierto período de tiempo, lo cual puede provocar en el átomo un cambio hacia un elemento diferente. Este proceso se denomina decaimiento, y el tiempo que dura es característico del isótopo radiactivo.

De esta forma, un elemento que absorbe un neutrón puede ser identificado bien por la radiación que emita, o bien por el tiempo que dure el decaimiento.

Desde que se descubrieron los neutrones, especialmente a mediados del siglo pasado, se han estudiado detenidamente las emisiones radiactivas resultantes de interacción de los neutrones con todos los elementos, así como cualquier característica relativa a este proceso. Estos estudios se han llevado a cabo por distintos laboratorios y organismos de todo el mundo. Como resultado, se ha catalogado toda la información necesaria para conocer todos los parámetros teóricos que intervienen en estas reacciones.

El análisis elemental así realizado se conoce como análisis por activación neutrónica, y es una técnica conocida que se aplica en el análisis cuantitativo y cualitativo de un gran número de elementos en muchos campos de interés tanto científico como técnico.

El desarrollo de la electrónica, de la informática y de los sistemas de control y manipulación de muestras, hace más preciso y más rápido, cada día, el tratamiento de la información extraída de la detección de la radiación, de forma que nos permita aplicar el análisis por activación neutrónica en distintos campos de la ciencia y de la industria.

Básicamente, los elementos requeridos para llevar a cabo cualquier método de análisis por activación neutrónica son: una fuente de neutrones, un sistema de detección de radiación y el conocimiento exacto de las reacciones que ocurren cuando los neutrones inciden con los elementos presentes en la muestra.

A continuación se describen los distintos tipos de ejecución de los análisis por activación neutrónica:

- Análisis de activación neutrónica de rayos gamma instantáneos (PGNAA), donde se miden los rayos gamma producidos durante la reacción de la muestra con los neutrones incidentes y que permanecen en una radiactividad estable. En este caso, el detector mide la radiación producida instantáneamente mientras se está irradiando la muestra, y el dispositivo es tal, que mantiene el detector próximo a la fuente de neutrones.

- Análisis de activación neutrónica con rayos gamma diferidos (DGNAA), donde se miden los rayos gamma mientras está decayendo su radiactividad y en una fase posterior a la fase de irradiación con la fuente de neutrones. Este método es el usado en la invención y se puede conocer también con el nombre genérico de análisis por activación neutrónica (NAA).

- Análisis por activación neutrónica utilizando, fundamentalmente, neutrones epitermales (ENAA). Estos neutrones epitermales tienen energías entre 0,5 electrón voltios y aproximadamente 0,5 MeV y generalmente dan reacciones del tipo neutrón, gamma.

- Análisis por activación neutrónica empleando neutrones rápidos (FNAA). Los neutrones rápidos tienen energías superiores a los 0,5 MeV; estos neutrones contribuyen muy poco a la reacción neutrón gamma induciendo habitualmente reacciones del tipo:

    - neutrón, protón;

    - neutrón, neutrón y

- neutrón, 2 neutrones.

• Análisis por activación neutrónica instrumental (INAA). Es la aplicación de la técnica de activación neutrónica en la que los procedimientos utilizados son puramente instrumentales, sin manipulación previa ni posterior de las muestras.

• Análisis de activación neutrónica radio químicas (IRNAA). Esta técnica implica el uso de separaciones químicas de las muestras, después de la irradiación con los neutrones, con objeto de eliminar elementos que produzcan interferencias en la hora de la lectura de la radiación o para concentrar isótopos de interés.

La ejecución de un análisis por activación neutrónica implica la consideración de distintos factores:

• El tipo de análisis de activación neutrónica que se va a realizar. Éste depende de las reacciones que se pretenden producir.

• El tipo de fuente de neutrones, su actividad, su geometría, su distancia a la muestra.

• La cantidad de muestra a medir.

• El dispositivo de manipulación de las muestras:

- el sistema de posicionamiento de la muestra frente a la fuente de neutrones,
- el tiempo de irradiación de la muestra,
- el sistema de desplazamiento de la muestra hasta el detector,
- el tiempo de medida frente al detector.

• El tipo de detector y sus características.

• La instrumentación que permita:

- discriminar la energía de la radiación gamma relacionada con el elemento a medir,
- el sistema de almacenamiento de los datos,
- de transmisión de los mismos,
- etc...

En lo que se refiere a la invención, en la bibliografía científica se encuentra información acerca de los resultados teóricos respecto a interacción de todo tipo de partículas radiactivas con el flúor, y entre los neutrones y los elementos habitualmente asociados a las mineralizaciones de flúor.

De entre todas las posibles reacciones, la usada en la invención es la reacción (n,α) que presenta ventajas respecto a la implementación del invento.

El umbral de la reacción nuclear (n,α) utilizada para la activación del flúor es sensiblemente igual a 3,2 MeV. Todos los neutrones cuya energía sea inferior a este valor no contribuyen a la activación del flúor según esta reacción.

Cuando los neutrones de este tipo bombardean átomos de flúor, se producen partículas alfa y nitrógeno, según la reacción siguiente:

$$^{19}_{9}F(n,\alpha)^{16}_{7}N$$

Este nitrógeno es un isótopo inestable del nitrógeno que, con un periodo de semidesintegración de 7,13 segundos, produce un núcleo hijo estable que es el oxígeno junto con un espectro de rayos gamma según la tabla siguiente:

Energía (keV)	Intensidad (%)	Dosis (MeV/Bq-s)
787.2	1.5E-6%	1.2E-8
867.7	2.100E-4 %	1.822E-6
986.93	0.0034 %	3.4E-5
1067.5	1.5E-5 %	1.6E-7
1754.9	0.121 %	0.00212
1954.7	0.038 %	7.4E-4
2741.5	0.82 %	0.0225
2822.2	0.13 %	0.0037
6048.2	0.14 %	0.0084675
6128.63	67.0 %	4.11
6915.5	0.038 %	0.0026
7115.15	4.9 %	0.35
8869.3	0.076 %	0.0067

Este Nitrógeno es fácilmente detectable, tanto por su elevado nivel de energía 6128,63 KeV como por el corto periodo de semidesintegración de 7,13 segundos. Se produce después de la irradiación, por lo que la técnica empleada es la denominada NAA o de análisis por activación neutrónica usando la lectura de los rayos gamma diferidos.

Estos conocimientos son la base científica en la que se fundamenta la invención y condiciona totalmente el dispositivo y los elementos

precisos para llevar a cabo la invención, así como el procedimiento de ejecución de la medida. La información acerca del contenido de flúor se obtiene en pocos minutos.

Las otras técnicas convencionales de análisis de los minerales de flúor son fundamentalmente de tipo químico. Se utilizan procedimientos gravimétricos basados en el método Bidtel, procedimientos volumétricos basados en el método Bayer y, para requerimientos menos precisos, se usan métodos colorimétricos.

La norma UNE 7307 de 1986 describe el procedimiento para la determinación gravimétrica de carbonato cálcico, sílice, fluoruro cálcico y el espato flúor.

Estas técnicas determinan en algunos casos el contenido en flúor por diferencias y requieren una minuciosa preparación de la muestra. Ello supone un tiempo de preparación y análisis elevado. El método de activación neutrónica supone una reducción del tiempo de análisis al utilizar muestras sin previa elaboración y, además, el tiempo de realización del análisis es de pocos minutos.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN.

La invención implica:

- un nuevo equipamiento para llevar a cabo la determinación de la concentración de flúor en minerales o compuestos de flúor, basado en técnicas de activación neutrónica. El equipamiento consiste esencialmente en:
  - Una fuente de neutrones perfectamente blindada para que no emita neutrones al exterior. En su blindaje existe un hueco por donde se introduce, a través de un portamuestras, una muestra de mineral de flúor, de tal manera que la muestra queda casi en contacto con el emisor de neutrones.
  - Un detector de la radiación capaz de medir rayos gamma de una energía en torno a 6 MeV. Este detector envía el espectro a un analizador multicanal. El detector debe situarse de manera que no esté afectado por la radiación procedente de la fuente de neutrones.
- un procedimiento de operación que permite la manipulación de las muestras según las características del proceso que se está induciendo, y
- un sistema de cálculo de leyes. Este sistema se basa en un método de calibración que permita obtener los parámetros básicos del sistema de cálculo para unas condiciones dadas de la muestra.

Problema técnico planteado.

Tanto en la mina como en una planta de concentración de mineral de flúor, o una planta de manipulación de mineral o compuestos de flúor, es necesario conocer las leyes de flúor en distintos puntos del proceso de la manera más rápida posible. Como idea general, en una planta de

concentrado de mineral de flúor, como por ejemplo de fluorita, se tienen al menos 6 ó 7 puntos de control de leyes, y es práctica habitual tomar muestras cada dos horas. Si cada análisis supone varias horas, esto implica una gran actividad del laboratorio químico y una demora importante entre el momento de la toma de muestras y la disposición de la información. Así, no será posible realizar un control instantáneo de la planta.

Por otra parte, en otros casos es necesario, antes del análisis químico, realizar una preparación de la muestra que supone también un tiempo de varias horas.

Solución planteada.

La presente invención se refiere a un sistema de análisis de minerales o compuestos de flúor por el método de activación neutrónica diferida orientada hacia la producción de la reacción $^{19}_{9}F(n,\alpha)^{16}_{7}N$ y a la lectura del Nitrógeno producido a través de la detección de los rayos gamma diferidos emitidos.

Este método presenta las ventajas de su exactitud y rapidez de ejecución y obtención de las concentraciones de flúor, que se ve potenciada por el hecho de que no es necesario preparar la muestra previamente.

Para que se produzca esta reacción sin interferencias, es necesario que los neutrones tengan una energía mayor que 3,5 MeV y menor que 10 MeV. Por lo tanto, es necesaria una fuente de neutrones que, o bien produzca neutrones con esta energía, como por ejemplo la de Americio - Berilio, o si es mayor, como es el caso de los generadores de neutrones, que se interponga entre la fuente y la muestra un moderador de neutrones hasta conseguir que tengan esta energía.

El nitrógeno producido en esta reacción, al ser inestable, decae a un elemento estable y con ello emite unos rayos gamma característicos que tienen una energía de 6128,63 keV y una constante de semidesintegración de 7,13 segundos. La energía es mayor que cualquier otra energía producida por otros rayos gamma resultantes de cualquier otra interacción de los neutrones con los elementos que acompañan a la mineral de flúor. El tiempo de semidesintegración es característico del proceso y es lo suficientemente corto para que se pueda decir que el análisis del mineral o compuesto de flúor por este método es casi instantáneo. El inconveniente de este corto tiempo es que es preciso desplazar la muestra irradiada desde el emisor de neutrones hasta el detector en un tiempo mínimo y exacto. La precisión del sistema depende de esto.

En consecuencia, este procedimiento permite obtener las leyes de flúor en un tiempo de operación de pocos minutos y con un grado de exactitud muy elevado.

Ventajas técnicas que aporta la invención.

La invención aporta varias ventajas:

- Fiabilidad de las técnicas de activación neutrónica.
- Rapidez en la obtención del valor de la ley del mineral o

compuesto de flúor. La información casi instantánea de las leyes permite una actuación más rápida de los parámetros de trabajo de la planta de concentración y una mejora en el proceso de producción.

• Representatividad. El tamaño de la muestra es mayor que con otros sistemas de análisis, por lo que su representatividad es mayor.

• Las exigencias respecto a la preparación de la muestra son menores que con otros sistemas.

• La calibración con distintas características de las muestras hace que el método se emplee indistintamente en muestras con distintos grados de molienda, de humedad, etc. Así, es posible realizar una calibración con muestras de una planta de concentración en distintas condiciones de secado, o procedentes de la mina con distintos grados de molienda. Esta calibración permite procesar y analizar adecuadamente y con precisión estas muestras.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS.

En la Figura 1 se ve la parte estructural del equipo formado por un bloque y constituido por:

• un contenedor (1),

• material moderador y absorbente de neutrones, tal como parafina borada (2),

• una guía(5),

• una apertura superior (6),

• ventana inferior (8),

• un marcador del lado del detector (14),

• un marcador del lado opuesto al detector (15),

• blindaje (16) de un material absorbente de radiación gamma como, por ejemplo, el plomo.

En la Figura 2 se aprecian los elementos móviles del equipo:

• un alojamiento (3),

• una la fuente de neutrones (4),

• el contenedor de la muestra (7),

• el portamuestras (11),

• un hueco cilíndrico (12),

• un material moderador y absorbente de neutrones (13).

En la Figura 3 se representa la parte del equipo que corresponde al sistema de detección del espectro, así como a la transmisión y

almacenamiento y manipulación de datos. Se observan las siguientes partes:

- un detector de radiación (9),
- y su zócalo (10),
- analizador multicanal (17),
- el cable (18),
- ordenador (19),
- el espectro (20).

En la Figura 4 se observa el dispositivo completo en la fase de lectura de la muestra y los siguientes componentes:

- un contenedor (1),
- material moderador y absorbente de neutrones, tal como parafina borada (2),
- un alojamiento (3),
- una fuente de neutrones (4),
- una guía (5),
- una apertura superior (6),
- el contenedor de la muestra (7),
- ventana inferior (8),
- un detector de radiación (9),
- y su zócalo (10),
- el portamuestras (11),
- un hueco cilíndrico (12),
- un material moderador y absorbente de neutrones (13),
- un marcador del lado del detector (14),
- un marcador del lado opuesto al detector (15),
- blindaje (16) de un material absorbente de radiación gamma como, por ejemplo, el plomo,
- analizador multicanal (17),
- el cable (18),
- ordenador (19),
- el espectro (20).

En la Figura 5 se aprecia el mismo dispositivo en la fase de irradiación de la muestra. Como diferencia con respecto a la situación anterior, se observa que no se está registrando el espectro en el momento de la irradiación.

EXPLICACIÓN DE UNA REALIZACIÓN PREFERENTE.

La presente invención se ilustra adicionalmente mediante el ejemplo y los dibujos que se acompañan, los cuales no pretenden ser limitativos de su alcance.

El equipamiento para llevar a cabo la determinación del contenido en flúor en una muestra consiste en:

1. Un bloque como el que se ilustra en la Figura 1, formado por un contenedor (1), que puede ser cilíndrico o no, pues este aspecto es indiferente para la invención. Está relleno de un material moderador y absorbente de neutrones, tal como parafina borada (2). Este contenedor (1), tiene un hueco en el que se puede desplazar un alojamiento (3), Figura 4, en cuyo centro se sitúa una fuente de neutrones (4) y cada extremo se sella con parafina borada. El emplazamiento de la fuente de neutrones se hace desde una ventana lateral abierta en el alojamiento (3). El tamaño del alojamiento (3) de la fuente de neutrones (4) del hueco del contenedor (1) depende del tamaño de la propia fuente de neutrones.

   El tamaño del contenedor de la Figura 1 es tal, que el flujo de neutrones en la parte externa del contenedor sea lo más pequeño posible. Las paredes del contenedor son del material y del espesor adecuados para que la radiación en su pared exterior sea mínima, así como para aportar resistencia al conjunto.

   El contenedor (1) está atravesado por una guía (5), Figura 1, que sobresale por ambos lados del contenedor (1). En la parte que sobresale hacia un lado respecto al contenedor (1), la guía (5) tiene una apertura superior (6) del diámetro adecuado para introducir el contenedor de la muestra (7). Diametralmente opuesto a esta ventana (6), existe otra ventana inferior (8) con un sistema de sujeción capaz de sostener un detector de radiación (9) y su zócalo (10).

   La guía (5) será tangente al alojamiento (3) de la fuente de neutrones (4) y estará abierta frente a la fuente (4) para permitir que el flujo de neutrones que llegue a la muestra sea el máximo. Se tiene que disponer de neutrones con una energía entre 3 y 8 MeV.

   En el interior de esta guía (5) se encuentra el portamuestras (11) de la muestra de mineral o compuesto (7), que se aprecia en la Figura 2. La forma del portamuestras (11) está condicionada por la forma de la guía (5). Puede ser de sección circular o cuadrada o cualquier otra, puesto que esto es indiferente para la invención.

   El portamuestras (11) está abierto transversalmente según un hueco cilíndrico (12) que permite colocar el contenedor de la muestra (7) por la parte superior, aunque dispone de un pequeño reborde en su parte inferior para sujetar el contenedor de la muestra (7). En su interior, excepto en el hueco cilíndrico (12) para colocación de la muestra (7), todo el portamuestras (11) está lleno de un material moderador y absorbente de neutrones (13).

Como se observa en la Figura 4, cuando el portamuestras (11) está en la posición de introducción del contenedor de la muestra, la ventana del contenedor de la muestra (12) está enfrentada a la ventana superior (6) y a la ventana inferior (8) de la guía (5). Esta posición es la misma que la posición de medida de la radiación gamma.

Esta posición está controlada en el proceso por un marcador del lado del detector (14), situado en la guía (5). El otro extremo del portamuestras (11), que se encuentra relleno del material moderador y absorbente de neutrones (13), coincide con el borde del contenedor (1) para así garantizar la mínima emisión de neutrones desde el contenedor.

Cuando el portamuestras (11) de la muestra (7) está en la posición de irradiación, el contenedor de la muestra (7), Figura 5, quedará situado encima directamente de la fuente de neutrones (4). De esta manera se garantizará un mayor aprovechamiento de los neutrones emitidos.

Un marcador del lado opuesto al detector (15) situado en la guía (5), indica que el contenedor de la muestra (7) se encuentra en la posición adecuada. La longitud del portamuestras (11) es tal que el otro extremo del portamuestras (11) coincide con el borde del contenedor (1).

Los marcadores pueden ser como los que se ha indicado o de cualquier otro tipo, siempre que permitan controlar las dos posiciones extremas del portamuestras (11).

El sistema que desplaza el dispositivo puede ser un cilindro neumático, o cualquier otro sistema que consiga un desplazamiento en un tiempo igual en cada desplazamiento. Para garantizar la exactitud en las posiciones se debe disponer de un sistema de control de la posición, que puede ser desde finales de carrera a cualquier otro sistema de indicación de la posición.

2. Un conjunto capaz de captar, analizar y registrar la radiación de fondo, así como la radiación gamma emitida por la muestra después de su irradiación. Este conjunto está formado por un detector de rayos gamma (9), Figura 3, aislado respecto a la fuente de neutrones (4) a través del blindaje (16) de un material absorbente de radiación gamma como, por ejemplo, el plomo, de forma que la lectura realizada sin muestra activada, llamada ruido de fondo, leída por el detector (9) sea lo más baja posible.

Este detector (9) estará sujeto por cualquier sistema de sujeción a la ventana inferior (8) de la guía (5) y situado en una posición tangente al portamuestras (11), de tal manera que pueda leer la radiación procedente de la misma, preferiblemente desde la misma superficie desde donde se irradió. El detector (9) debe ser capaz de leer la radiación gamma entre 4 y 10 MeV, con la suficiente resolución.

El detector (9) tendrá asociado el zócalo (10), que estará conectado al analizador multicanal (17) por medio del cable (18). El analizador multicanal (17) envía las señales al

ordenador (19) donde se recoge el espectro (20) que se estudia para controlar las leyes de flúor de la muestra.

3. Opcionalmente se puede incorporar al equipo un sensor de peso o de la humedad, que permita cuantificar la cantidad de muestra y la humedad de la misma. Si no se dispone de estos, hay que hacer las mediciones previas necesarias sobre la muestra para poder calcular la concentración de flúor.

Respecto al procedimiento de operación incluye las tareas necesarias para:

1. Colocar el portamuestras (11) en la posición de contacto con el marcador (14) del lado del detector, Figura 4. En esta posición, es posible introducir el contenedor de la muestra (7) desde la apertura superior (6) de la guía (5) hasta el hueco (12) del portamuestras (11).

2. Desplazar el portamuestras (11) por el interior de la guía (5) hasta que el extremo del portamuestras (11) coincida con el marcador (15) del lado opuesto al detector (Figura 5). En esta posición se garantiza que el contenedor de la muestra (7) esté situado frente a la fuente de neutrones (4).

3. Permitir la permanencia del contenedor de la muestra (7) frente a la fuente (4) durante un tiempo que se establece, según la masa a medir, en torno a dos minutos. Este tiempo se denomina tiempo de activación.

4. Desplazar del portamuestras (11) hasta situarse junto al marcador (14) del lado del detector. En esta posición, el contenedor de la muestra (7) se sitúa exactamente frente al detector (9) (Figura 4). Esta operación tiene que llevar un tiempo mínimo, fijo y exacto para todas las medidas.

5. Permitir la permanencia del contenedor de la muestra (7) frente al detector de rayos gamma (9) durante un tiempo fijo y definido, del orden de 25 segundos. Este tiempo se denomina tiempo de lectura.

6. Evacuar el contenedor de la muestra (7) del hueco (12) del portamuestras (11) a través de la apertura superior (6) de la guía (5).

Estas tareas pueden ser controladas por cualquier tipo de sistema de automatismo, tanto informático como eléctrico, etc., y ejecutadas con distintos tipos de actuadores neumáticos, manuales, etc.

Respecto al sistema de cálculo de leyes, la invención incluye un analizador multicanal (17), que permite extraer el espectro de lectura del detector de rayos gamma (20) y analizar las cuentas emitidas durante el tiempo de lectura en un intervalo que incluye la energía de 6,13 MeV, energía principal de emisión en el decaimiento del 167N. Este contaje es directamente proporcional a la concentración de flúor en la muestra.

El sistema de cálculo de leyes incluye cualquier procedimiento, informático o no, que a partir de la lectura extraída por el analizador en el rango de energías indicado y de los factores de influencia, tales como

el peso conocido de la muestra y del tipo de muestra, permita pasar de la intensidad de la radiación a la concentración de fluorita.

REIVINDICACIONES

1. Un equipo para el análisis de flúor contenido en una muestra de mineral o compuesto de flúor, por métodos de activación neutrónica, que comprende:
   - una fuente capaz de emitir neutrones,
   - al menos un detector capaz de medir radiación gamma,
   - al menos un portamuestras capaz de albergar y fijar la posición del contenedor de la muestra en el portamuestras, que esté dotado de un acceso que permita introducir y extraer el contenedor de la muestra. El portamuestras tiene una sección hueca o no, que permite el paso de los neutrones desde la fuente hasta la muestra, y una sección hueca o no, que permite el paso de la radiación gamma desde la muestra hasta el detector.
   - un conjunto que comprende un contenedor y un material moderador y absorbente de neutrones; al menos una guía para el portamuestras; un alojamiento, que puede usarse o no, para contener la fuente de neutrones; un soporte para el detector de la radiación; y unos marcadores para posicionar el portamuestras,
   - un blindaje para el detector,
   - un sistema de captación y tratamiento del espectro,
   - un sistema de registro y almacenamiento de los datos del espectro.

2. El equipo de la reivindicación 1, donde la fuente de neutrones es del tipo alfa Berilio, por ejemplo, de americio berilio.

3. El equipo de la reivindicación 2, donde la actividad de la fuente es de, al menos, 1 Curio o donde la fuente de neutrones es capaz, al menos, de emitir un flujo de neutrones rápidos equivalente al flujo de neutrones rápidos producidos por una fuente de americio berilio de 1 Curio.

4. El equipo de la reivindicación 1, donde el emisor de neutrones es un generador de neutrones capaz, al menos, de emitir un flujo de neutrones rápidos de menos de 10 MeV, equivalentes al flujo de neutrones rápidos producido por una fuente de americio berilio de 1 Curio.

5. El equipo de la reivindicación 1, donde el detector es capaz de medir la radiación gamma en el rango de energías al menos entre 4 y 8 MeV, produciendo una señal eléctrica de magnitud tal que permita ser utilizable por los equipos posteriores de la cadena de medida.

6. El detector de la reivindicación 5, donde el detector es también capaz de medir la radiación gamma en el rango de energías de las fuentes de calibración.

7. El equipo de la reivindicación 1, donde las secciones de paso de los neutrones y de la radiación gamma puedan ser o no la misma y estar adyacentes o no al contenedor de la muestra.

8. El equipo de la reivindicación 7, donde la sección de paso de los neutrones y de la radiación gamma está materializada mediante

una ventana hueca realizada en el portamuestras.

9. El equipo de la reivindicación 1, donde el portamuestras está relleno de un material moderador y absorbente de los neutrones en todo su interior, excepto, al menos, en la sección de paso de los neutrones y en la parte reservada para albergar el contenedor de la muestra.

10. El equipo de la reivindicación 9, donde el material absorbente de neutrones del portamuestras comprende al menos una sustancia seleccionada del grupo constituido por: boro, indio, cadmio, gadolinio, hafnio, samario, europio, disprosio, rodio, erbio, talio, iridio, platino, oro o bien por sus compuestos químicos.

11. El equipo de la reivindicación 1, donde la distancia entre la fuente y el contenedor de la muestra cuando el portamuestras se encuentra en la posición de irradiación es tal que el flujo de neutrones en el punto más cercano a la fuente es, al menos, de $1*10^{6}$ neutrones/(segundo*mm^{2}).

12. El equipo de la reivindicación 1, donde el contenedor puede ser cilíndrico.

13. El equipo de la reivindicación 1, donde el contenedor está relleno de un material moderador y absorbente de los neutrones en su interior, salvo en las zonas donde se desplaza el portamuestras.

14. El equipo de la reivindicación 13, donde el material de relleno del contenedor comprende, al menos, una sustancia seleccionada del grupo constituido por: boro, indio, cadmio, gadolinio, hafnio, samario, europio, disprosio, rodio, erbio, talio, iridio, platino, oro o bien por sus compuestos químicos.

15. El equipo de la reivindicación 1, donde la guía para el portamuestras puede ser una o más, y dirige el movimiento del portamuestras hasta colocar el contenedor de la muestra o bien delante del detector, o bien delante de la fuente de neutrones.

16. El equipo de la reivindicación 15, donde la guía o guías para el portamuestras pueden, individualmente, ser horizontales, verticales o tener cualquier otra orientación espacial.

17. El equipo de la reivindicación 1, donde el alojamiento para contener la fuente de neutrones se utiliza para contener un tubo portafuentes, que permita introducir y extraer la fuente.

18. El equipo de la reivindicación 1, donde los marcadores están formados por cualquier tipo de marca, tope, final de carrera o cualquier otro dispositivo que permita situar correctamente el portamuestras de forma que el contenedor de la muestra esté o bien sobre el detector, o bien sobre la fuente de neutrones.

19. El equipo de la reivindicación 1, donde el accionamiento del portamuestras se realiza mediante un sistema que comprende, al menos, alguno de los siguientes: manual, mecánico, neumático, hidráulico, eléctrico, o cualquier otro que permita el movimiento del portamuestras.

20. El equipo de la reivindicación 1, donde el blindaje forma una barrera entre el contenedor y el detector, de manera que cualquier

línea recta que pase por cualquier punto del interior del volumen del contenedor solo pueda pasar por el detector a través del blindaje.

21. El equipo de la reivindicación 20, donde el blindaje tiene forma cilíndrica concéntrica con el detector.

22. El equipo de la reivindicación 20, donde el material de blindaje y su espesor sean tales que permitan obtener una relación entre el número de cuentas leído en el intervalo de medida con cualquier muestra activada y las cuentas leídas en las mismas condiciones, pero sin muestra, sea tal que haga operativo el método de cálculo.

23. El equipo de la reivindicación 1, donde el sistema de captación y tratamiento del espectro es cualquier analizador que tenga capacidad, al menos, de clasificar las distintas energías de los rayos gamma, y que sea capaz de llegar a medir hasta, al menos, rayos gamma de 10 MeV.

24. El equipo de la reivindicación 1 donde el sistema de captación y tratamiento del especto es cualquier analizador que tenga capacidad, al menos, de medir e integrar el número total de cuentas en un intervalo que comprenda, al menos, la energía en torno a 6 MeV.

25. El equipo de la reivindicación 1, donde el sistema de registro y almacenamiento de los datos puede ser un ordenador comercial con las conexiones idóneas para conectarse al equipo de captación y registro de datos, o bien cualquier otro equipo que cumpla su misma función.

26. Un procedimiento para el análisis de flúor contenido en una muestra de mineral o compuesto de flúor, por métodos de activación neutrónica, que comprende el siguiente protocolo:

- introducción del contenedor de la muestra en el portamuestras,
- desplazamiento del portamuestras hasta la posición en la que el contenedor de la muestra queda enfrentado con la fuente de neutrones,
- irradiación de la muestra por los neutrones durante un tiempo de activación,
- desplazamiento del portamuestras hasta que el contenedor de la muestra queda enfrentado con el detector,
- lectura y registro durante un tiempo de lectura, del espectro de energías de los rayos gamma producidos por la irradiación de la muestra,
- extracción de la muestra.

27. El procedimiento de la reivindicación 26, donde el tiempo de irradiación se mide con cualquier tipo de sistema, automático o no.

28. El procedimiento de la reivindicación 26, donde el desplazamiento del portamuestras hasta la posición en que el contenedor de la muestra queda enfrentado con el detector de la radiación se realiza por cualquier modo, manual o no, y controlado para que se mantenga constante.

29. El procedimiento de la reivindicación 26 donde se induce el

comienzo de la lectura en el instante en que el contenedor de la muestra está frente al detector, o bien un intervalo de tiempo constante antes de esta posición.

30. El procedimiento de la reivindicación 29, donde la forma de inducirlo es mediante una señal, eléctrica o no.

31. El procedimiento de la reivindicación 26, donde el tiempo de medida de la muestra es constante.

32. El procedimiento de la reivindicación 26, donde el tiempo de lectura de la radiación emitida por la muestra activada se controla con un sistema automático.

33. El procedimiento de la reivindicación 26, donde la muestra o bien no se pesa o si se pesa, se hace en una fase previa o posterior al proceso de análisis, o bien en algún momento durante el proceso de análisis.

34. Un método de cálculo para usar con el equipo de análisis de flúor contenido en una muestra de mineral o compuesto de flúor, por métodos de activación neutrónica, que comprende los siguientes pasos:

- lectura del espectro o recuperación de un espectro almacenado,
- integración de las cuentas del espectro en un intervalo comprendido entre una energía mínima y una máxima, en cuyo interior se encuentre, al menos, la energía de 6 MeV,
- utilización de una función de calibración previamente obtenida, y válida para todo el conjunto de medidas efectuadas posteriormente a la calibración y hasta que se produzca una nueva calibración, para calcular la ley de una muestra de mineral de flúor.

35. El método de cálculo de la reivindicación 34, donde la función de calibración relaciona, al menos, la ley conocida de un conjunto de muestras de mineral de flúor con las cuentas de su espectro, almacenándola en el ordenador.

36. El método de cálculo de la reivindicación 35, donde se usa una función de calibración simplificada donde al menos uno de los siguientes parámetros se mantiene constante en el conjunto de muestras: masa, granulometría y humedad.

37. El método de cálculo de la reivindicación 34, donde la energía mínima del intervalo del espectro es mayor de 3 MeV y menor que 6 MeV.

38. El método de cálculo de la reivindicación 34, donde la energía máxima del intervalo del espectro es mayor de 6 MeV y menor que 10 MeV.

FIGURA 1

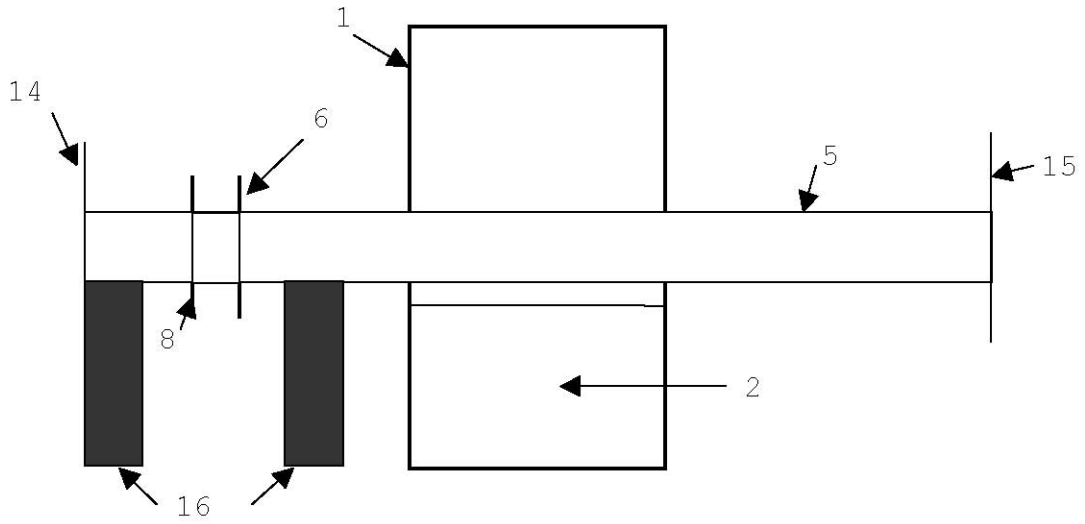


FIGURA 2

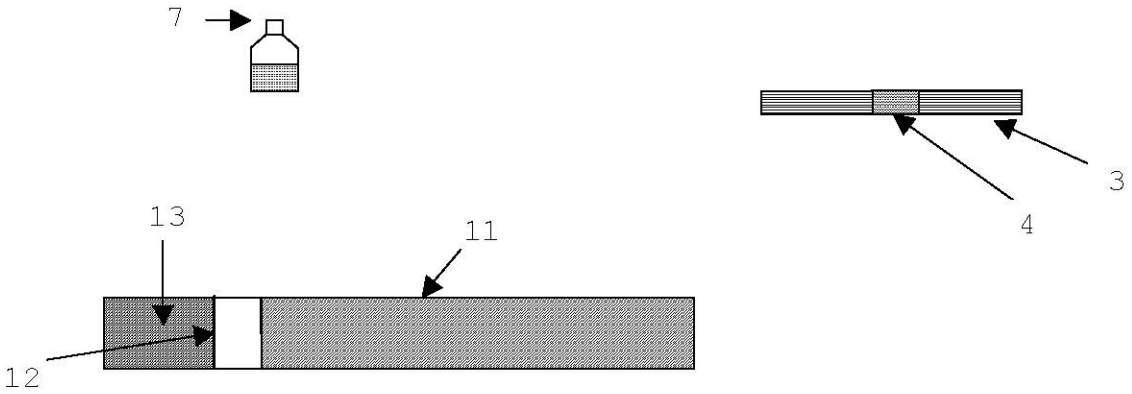


FIGURA 3

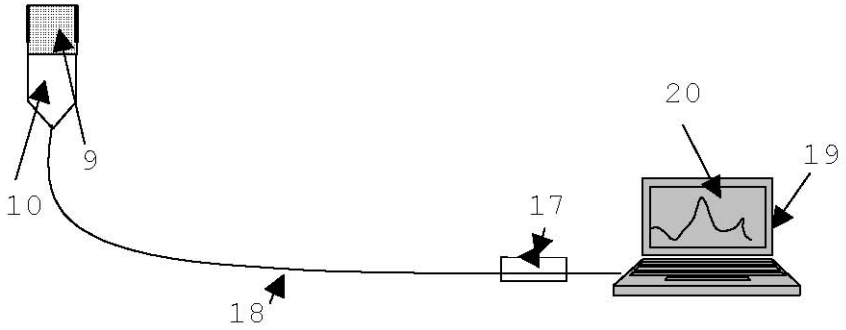


FIGURA 4

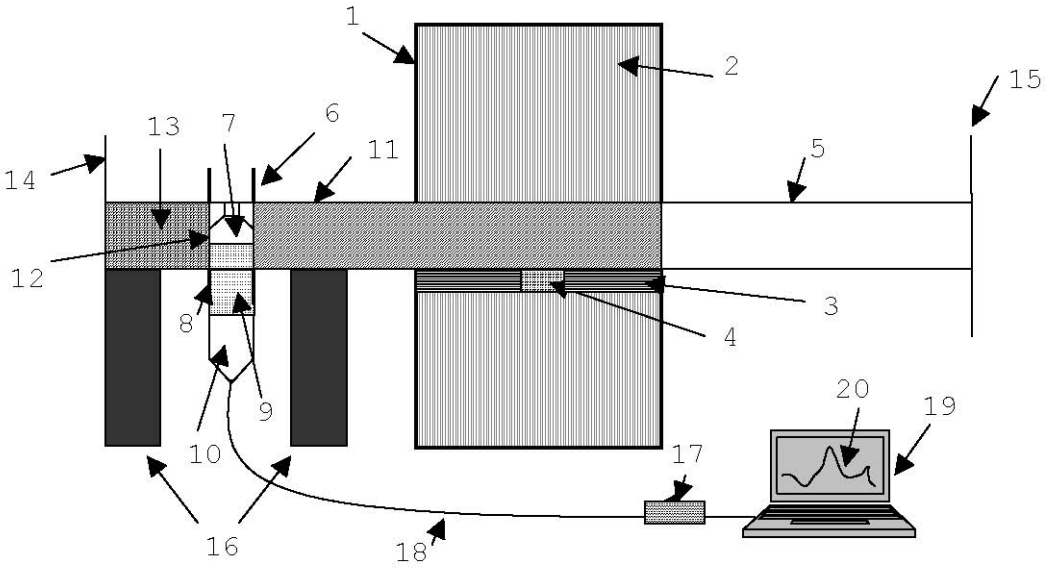
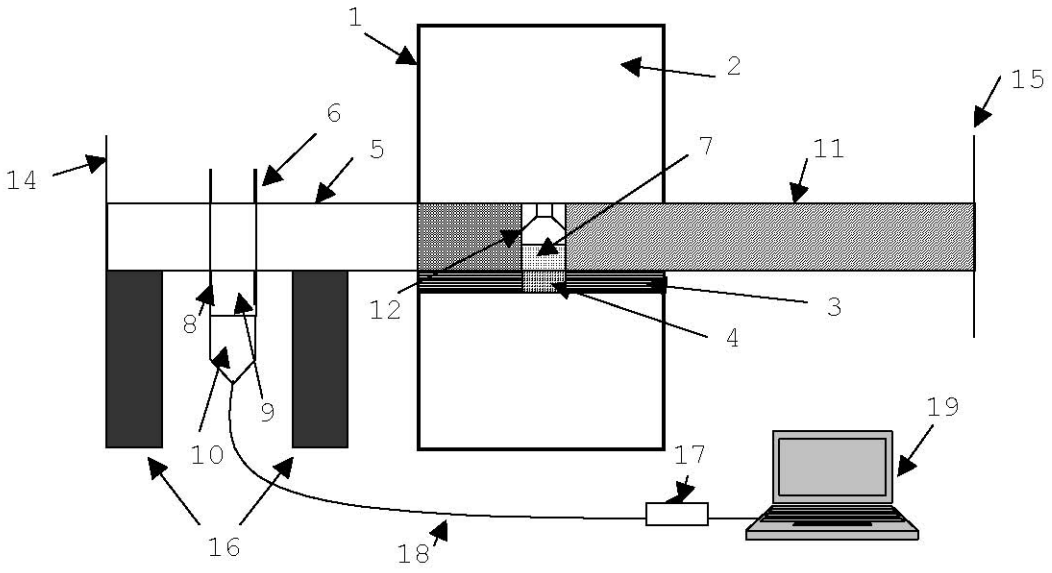


FIGURA 5



Anexo: Protección contra la radiación.

La protección frente a la radiación.

La intensidad del campo de radiación decrece al aumentar la distancia de la fuente. Entonces, aumentando la distancia reduciremos la cantidad de exposición recibida.

En muchas ocasiones, especialmente cuando trabajamos con fuentes puntuales, es más eficaz aumentar la distancia de la fuente que disminuir el tiempo de exposición a la radiación.

Teóricamente, una fuente puntual es un punto imaginario en el espacio, a partir del cual emana la radiación.

Aunque esta suposición no es real, ya que todas las fuentes tienen dimensiones, cualquier fuente de radiación geométricamente pequeña se comporta como una fuente puntual cuando se está a una distancia mayor de tres veces la máxima dimensión de la fuente.

La radiación de una fuente puntual se emite igualmente en todas las direcciones. Así, los fotones se extienden cubriendo una área mayor según aumenta la distancia a la fuente. Este efecto es análogo a la expansión de la luz a partir de una fuente luminosa puntual o de una bombilla.

La intensidad de la radiación a partir de una fuente puntual disminuye de acuerdo con la ley de inverso el cuadrado de la distancia. Esta ley es inexacta en las proximidades de la fuente, pero se cumple a partir de una distancia de más de 3 veces la mayor dimensión de la fuente.

La expresión matemática de esta ecuación es:

$$I_1(d_1)^2 = I_2(d_2)^2$$

Donde,

- I_1 es la exposición que corresponde al punto 1.
- d_1 distancia entre la fuente y el punto 1.
- I_2 es la posición que corresponde al punto 2.
- d_2 es la distancia entre la fuente y el punto 2.

Esta ecuación supone que la atenuación de la radiación en el espacio entre puntos es despreciable y las dimensiones de la fuente del detector son pequeñas comparadas con la distancia entre las mismas.

En casos como tuberías o tanques, las fuentes no pueden ser tratadas como fuentes puntuales. En estas situaciones, las fuentes deben ser tratadas como fuentes que lineales o como fuentes planas.

Las partículas alfa son partículas relativamente pesadas, que se mueven lentamente, e interaccionan por ionización y excitación. Por eso, la radiación alfa no es muy penetrante, no supone riesgos externos, y puede ser blindada por unos pocos centímetros de aire o una hoja de papel.

Las partículas beta son partículas que se mueven rápidamente, relativamente ligeras. La radiación beta es moderadamente penetrante, dependiendo de la energía y de la velocidad de la partícula beta, y puede suponer riesgo externo. Puede ser blindada por materiales de

número atómico bajo, para prevenir la producción de radiación bremsstrahlung. Entre estos materiales se encuentran el plástico, la madera o el aluminio.

El blindaje de los fotones depende de la energía de fotón y del número atómico del material de blindaje.

Como en el caso de los neutrones, el objetivo es producir una partícula cargada a través de una interacción, preferiblemente por medio del efecto fotoeléctrico, en la cual, toda la energía del fotón se transfiera al electrón.

La profundidad media de penetración del fotoelectrón en el absorbente, antes de que pierda toda su energía cinética y se detenga, es muy corto, causando ionizaciones y excitaciones en el material de blindaje.

La energía del fotón se transfiere entonces al blindaje por los fotoelectrones.

Ya que los fotones interaccionan con los electrones, los fotones pueden ser blindados por cualquier material que proporcione una adecuado número de electrones.

Así, se pueden usar materiales con un número atómico elevados tales como el plomo o el uranio. Si el espacio no está limitado, se puede utilizar como un práctico material de blindaje, el agua o el hormigón.

Las partículas cargadas tienen una penetración definida en la materia. La penetración de una partícula cargada en un absorbente (range en inglés), es la profundidad media de penetración de la partícula cargada en el absorbente, antes de que pierda toda su energía cinética y se detenga.

Afectan a la penetración de la partícula cargada en el material, por parte de la partícula,

- La energía de la partícula, la cual es una función de la masa de la partícula y de su velocidad,
- y la carga eléctrica de la partícula,

y por parte del material de blindaje,

- La densidad atómica (número de átomos por centímetro cúbico),
- y el número atómico (Z).

Generalmente a mayor carga eléctrica y a mayor masa, menor penetración de la partícula cargada.

Contrariamente a menor masa y menor carga eléctrica de la partícula, la penetración es mayor.

Las partículas alfa se detienen en 2 o 3 pulgadas de aire. En tejido, las partículas alfa tienen una penetración de 70 – 100 micras. La penetración de la mayoría de las partículas alfa es tal que no pueden penetrar una capa de piel.

El factor que expresa la penetración de una partícula cargada en cualquier material es una unidad que se llama densidad-espesor.

La densidad-espesor, se puede calcular al multiplicar la densidad del material en gramos por centímetro cúbico por la distancia recorrida por la partícula en dicho material, expresada en cm.

Este producto densidad-espesor que tiene unidades de g/cm², puede ser considerado como una sección eficaz para una partícula cargada que atraviesa dicho material.

El concepto de densidad-espesor es importante en las discusiones que se refieren a la atenuación de la radiación beta en el tejido humano, en las ventanas de los blindajes del detector, y en filtros para dosimetría.

Aunque los materiales puedan tener diferentes densidades y espesores, si tienen el mismo valor densidad-espesor, atenuarán de la misma manera la radiación beta.

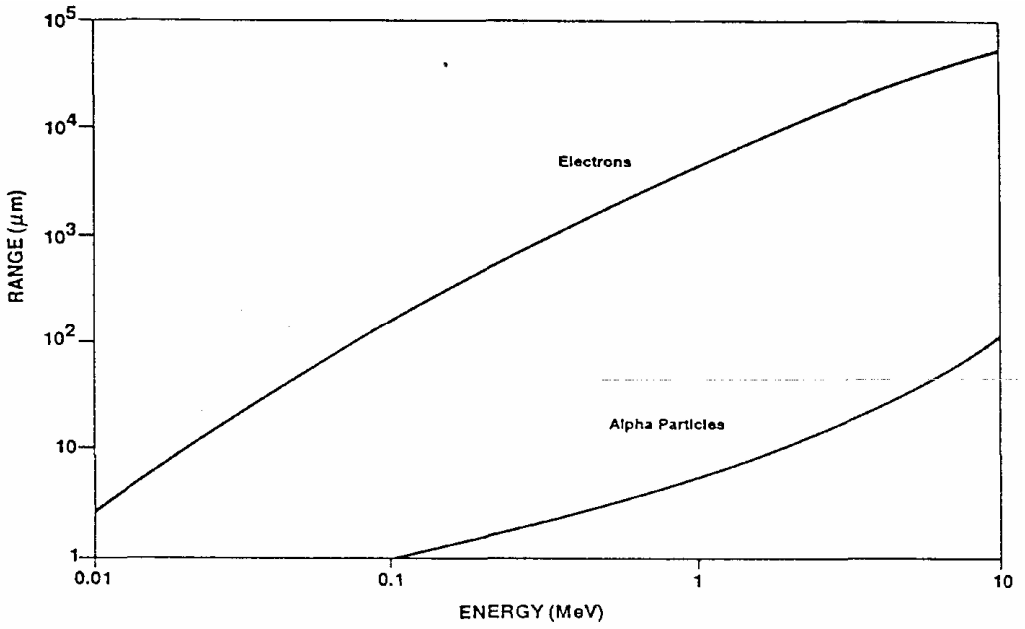


Figura 1. Penetración de las partículas alfa en tejidos blandos de densidad 1.

Los valores de penetración en el cuerpo humano se calcula:

- para la piel 0,007 cm
- Para el cristalino 0,3 cm
- Y para el tejido 1 cm.

La densidad del tejido humano blando, es 1 mg/cm^3, por lo que los valores de densidad- espesor para la piel es de 7 mg/cm^2, para el ojo 300 mg/cm^2, y para el resto del cuerpo 1 mg/cm^2.

Estos valores se pueden usar en el diseño de la instrumentación de los detectores de radiación, de forma que la ventana del detector y el blindaje tiene el mismo valor densidad-espesor o parecido. Por ejemplo, algunos instrumentos usan una ventana del detector de 0,7. mg/cm^2.

Cualquier radiación beta que pase a través de la ventana del detector podría pasar a través de una capa exterior del cuerpo humano y transmitir la energía al tejido o a la piel. La dosimetría externa, se

puede diseñar alrededor de estos valores, de forma que la dosis equivalente se puede determinar, tanto para la piel, como para el cristalino del ojo, o el resto del cuerpo.

Por ejemplo, se puede diseñar un filtro de dosimetría de alrededor de un de 1 mg/cm^2. Cualquier radiación que pasa a través de este filtro podría llegar al tejido profundo.

Las partículas beta tienen una penetración en el aire de alrededor de 10 pies por MeV de energía cinética.

Las partículas beta pueden penetrar la capa externa de la piel si poseen más de 0,07 MeV de energía cinética.

Para hacer un blindaje contra una radiación gamma o de rayos X, es importante comprender que los fotones que se eliminan corresponden a la probabilidad de que tenga lugar una interacción o bien por fenómeno fotoeléctrico, o por efecto Compton, o por producción de pares.

Este proceso se llama atenuación y puede definirse a través del "coeficiente de atenuación lineal", μ, el cual se puede definir como la probabilidad de que tenga lugar una interacción por unidad de longitud a través de un material.

El coeficiente de atenuación lineal varía en función de la energía del fotón y del tipo de material.

Matemáticamente, la atenuación de un rayo estrecho de fotones mono energéticos, viene dado por la ecuación:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

Donde,

- I(x) es la intensidad de radiación que sale a través de un material de espesor x
- I_0 es la intensidad de la radiación que entra en el material,
- μ es el coeficiente de atenuación lineal.
- x es el espesor de material.

Esta ecuación muestra que la intensidad se reduce exponencialmente con el espesor.

I(x) nunca es igual a cero a causa de que los rayos gamma y los rayos X interaccionan siguiendo una ley de probabilidad, y hay una probabilidad finita (aunque pequeña), de que un rayo pueda penetrar a través del material sin que haya interacción.

Los blindajes se hacen como un estudio tipo ALARA (as low as really possible) ¿??, y no como un estudio para un blindaje de intensidad de salida de la radiación nula.

La fórmula anterior se usa para calcular la intensidad de la radiación de un rayo estrecho a través de un blindaje de espesor X, o para calcular el espesor de un absorbente necesario para reducir la intensidad de la radiación a un nivel deseado.

Se puede disponer de tablas y gráficos que dan los valores de μ determinados experimentalmente para diferentes energías de la radiación en muchos materiales absorbentes.

A un mayor valor de μ, corresponde una mayor reducción en la intensidad de la radiación, para un espesor de material dado.

De hecho, el plomo tiene un alto valor de μ, para los rayos X y para los rayos gamma, lo cual es, en parte, la causa del amplio uso de este material como material de blindaje.

Además de la atenuación del rayo inicial de fotones por efectos fotoeléctrico, Compton o producción de pares, los fotones pueden *dispersarse* por interacciones Compton. Si el rayo es ancho, lo cual ocurre si las condiciones geométricas no son muy buenas, los fotones se pueden dispersar dentro del área de blindaje.

Los fotones dispersados se calculan por medio de un factor de acumulación B en la siguiente ecuación de atenuación:

$$I(x) = BI_0 e^{-\mu x}$$

Donde,

B es el factor de acumulación que siempre es mayor que 1.

La acumulación, se debe principalmente a la dispersión Compton. Siempre está presente, en alguna medida, en un medio absorbente que es atravesado por una radiación.

Con frecuencia, producen en una dispersión apreciable las paredes de la habitación, el suelo, y otros objetos sólidos suficientemente cercanos a la fuente de la radiación.

Cuando se utiliza una fuente puntual en estas condiciones, no es completamente válida la ley de inverso del cuadrado para contabilizar la intensidad de la radiación a una distancia determinada, por lo que se hace necesaria la medición instrumental de la radiación para determinar la exposición potencial en cualquier punto.

Blindaje de los neutrones.

El blindaje de los neutrones implica dos tareas:

- ralentizar los neutrones rápidos, y
- absorber los neutrones termales.

Por ejemplo, el control de las varillas en los reactores nucleares, se puede fabricar de boro, que es un buen material para absorber los neutrones termales. El blindaje de los neutrones es altamente dependiente de la energía del neutrón. El objetivo de el blindaje de los neutrones es generar una partícula cargada a través de una interacción.

La mejor interacción para blindar neutrones, sería una colisión elástica con un núcleo ligero, tal como un átomo de hidrógeno. Un núcleo del hidrógeno, consiste de un protón sencillo y permite una transferencia de energía significativa a un protón, a causa de que la masa del protón y del neutrón es casi la misma.

El neutrón colisiona con el protón, transfiriendo energía, y el protón retrocede de la nube de electrones. La profundidad media de penetración del protón liberado en el absorbente antes de que pierda toda su energía cinética y se detenga, es muy corta, causando ionizaciones y excitaciones a lo largo del camino de retroceso del

protón. Los neutrones pueden ser blindados por materiales con un contenido en hidrógeno alto, tales como agua, hormigón, plásticos, fuel oil, parafina etc.

Debido a las propiedades de los neutrones, la determinación de su blindaje es más compleja que en el caso de otras radiaciones por ejemplo la de los rayos X.

Los neutrones tienen que ser ralentizados y después capturados. Pero de este proceso surgen nuevas radiaciones, que deben ser tenidas en cuenta.

Los neutrones rápidos se ralentizan, o moderan, al colisionar con el material que se encuentra su camino. Las sustancias ricas en hidrógeno son bastante eficaces en este proceso, ya que los neutrones perderán más energía por colisión cuanto más ligera sea la sustancia con la que colisiona. Así, el agua, los plásticos y la parafina son los moderadores más eficaces. Esta es la razón por la cual los reactores nucleares están inmersos en tanques de agua.

Este proceso ralentiza a los neutrones a energías que llega a ser una fracción de un electrón voltio, es decir dentro del rango de los neutrones termales.

Si un neutrón termal o casi termal es capturado por el hidrógeno, se emite un rayo gamma.

Si un neutrón termal se encuentra con aluminio, este se convierte en dos isótopos diferentes,

- uno el Mg^{27} que emite rayos gamma de energía 0,84 y 1,02 MeV y que tiene una vida media de 9,5 minutos.
- El otro Na^{24} que emite rayos gama de 1,37 y 2, 75 MeV y que tiene una vida media de 14,9 horas.

Otros materiales tienen sus propias características respecto a las emisiones y a la vida media.

Así, cuando consideremos el blindaje de la fuente de neutrones una vez que los neutrones han sido moderados, la táctica que debemos emplear es seleccionar un material que no se convierta en radiactivo, o que tenga una vida media muy corta, y emita radiación que no sea demasiado penetrante, y sea, en consecuencia, fácil de absorber.

El boro es un material eficaz. Muta a litio, que emite partículas alfa de 2, 3 MeV, una partícula que es muy fácil detener.

Así, un laboratorio típico que tenga un generador de neutrones puede blindarse con medio metro de agua o polietileno, medio centímetro de ácido bórico, y algo de hormigón.

Por una parte a causa de esta propiedad de los neutrones de inducir radiactividad en otros materiales los neutrones tienen una mala reputación. Pero por otra parte, está propiedad hace que los neutrones serán muy útiles como una herramienta analítica.

Características de la parafina para moderar la energía de los neutrones

Los neutrones rápidos se absorben débilmente por la mayoría de los materiales, que tan sólo pueden dispersarlos.

Para realizar un blindaje eficaz de los neutrones rápidos, es necesario primero ralentizarlos, y después disponer un material que sea capaz de absorber los neutrones lentos.

Ya que la mayor parte de la transferencia de energía tiene lugar entre partículas de igual masa, los materiales hidrogenados son los más eficaces para ralentizar los neutrones rápidos.

El agua, la parafina, y el hormigón tienen un alto contenido en hidrógeno, por lo que son unos importantes blindajes de neutrones.

Una vez los neutrones han reducido su energía, se suele utilizar o bien boro o bien cadmio para absorber los neutrones ralentizados.

El polietileno borado se utiliza habitualmente como blindaje de neutrones rápidos.

El boro, material absorbente de los neutrones ralentizados, se distribuye más o menos uniformemente en polietileno, rico en hidrógeno. Cuando un átomo de boro captura un neutrón, emite una partícula, pero debido a que las partículas alfa tienen una penetración extremadamente pequeña, no supone ningún riesgo adicional.

El blindaje que usa cadmio para absorber los neutrones ralentizados, normalmente se construye en forma de capas. La captura del neutrón por el cadmio, origina la emisión de un rayo gama. Se debe utilizar plomo o un material absorbente de rayos gamma para blindarse contra estos gamma originados por el cadmio.

En este caso, un blindaje completo para una fuente de neutrones podría consistir de,

- primero, una gruesa capa de parafina para ralentizar a los neutrones,
- una capa que rodee a la anterior basada en cadmio para absorber los neutrones y lentos, y finalmente
- otra capa de plomo para absorber los rayos gamma tanto producidos por el cadmio, como aquellos que provengan de la cápsula con la fuente de neutrones.

En vez de usar el coeficiente de absorción másico o lineal, se usa la sección eficaz microscópica (σ), para describir la capacidad de un absorbente dado, para eliminar los neutrones procedentes de un rayo, y viene expresada, o bien en cm^2, o bien en una unidad llamada barn (b) que equivale a 10^{-28} m^2.

La sección eficaz representa el tamaño que tiene el átomo objetivo, en relación con la partícula que lo bombardea. Realmente, no es una área, sino la probabilidad de que tenga lugar la reacción.

La sección eficaz macroscópica, Σ, que es igual al número de átomos del absorbente por cm^3 (N), multiplicadas por la sección eficaz microscópica σ, tal que:

$$\Sigma = N\sigma$$

Y la atenuación de un rayo estrecho de neutrones mono energéticos y que pasan a través del material que sirve una relación exponencial, dada por la siguiente ecuación:

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-\Sigma x}$$

Donde,

- Φ(x) es el flujo de neutrones que sale de un material de tiene un espesor x
- Φ_0 que es el flujo de neutrones que entra en el material.
- Σ es la sección eficaz macroscópica total.
- x es el espesor de material.

Anexo: Secciones eficaces.

Secciones eficaces de la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16

De una manera más detallada, se recogen en las sucesivas tablas la siguiente información para la reacción 9-F-19(n,α)7-N-16,

- Fuente bibliográfica con referencia expresa a los autores y al año de la publicación.
- Tablas con las siguientes columnas:
  - Energía de los neutrones E, en keV. (Ene,keV).
  - Intervalo de error para la energía de los neutrones. (dEne,keV)
  - Sección eficaz σ, expresada en mb, de la reacción. (Sig,mb).
  - Intervalo de error de la sección eficaz. (dSig,mb)

[1] C.M.Bartle, P.A.Quin. 1981

Ene,keV	*dEne,keV*	*Sig,mb*	*dSig,mb*
4760	50	102	6
5540	40	153	9

[2] D.L.Smith, J.W.Meadows, J.F.Whalen. 1981.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
3344	45.5	3.117	0.461316
3443	44.5	8.902	1.21067
3544	42	17.13	2.31255
3644	42.5	24.5	3.283
3744	42.5	25.05	3.3567
3843	41.5	19.98	2.6973
3849	42	20.19	2.84679
3875	42.5	20.98	2.91622
3943	40	28.44	3.78252
3949	43.5	27.66	3.81708
3976	41	29.18	3.99766
4042	40	45	5.94
4048	41	43.82	5.9157
4076	40	44.53	5.96702
4141	39.5	44.88	5.92416
4147	39.5	52.74	7.01442
4177	39	53.62	7.13146
4237	40.5	73.23	9.59313
4243	40	74.93	9.89076
4277	38	85.36	11.2675
4379	39	102.1	13.4772
4480	37	87.44	11.6295
4580	37.5	81.96	10.9007
4680	37	93.92	12.4914
4781	36	120.4	15.8928
4861	127	102.4	14.4384
4867	126.5	104.3	14.8106
4882	36.5	107.5	14.19
4982	36	85.98	11.5213
4982	123	90.61	12.776
4989	116.5	91.52	13.0874
5082	34.5	89.1	11.9394
5098	116.5	91.8	12.9438
5106	112.5	89.66	13.0007
5217	110.5	94.26	13.2907
5225	108	91.67	13.2921
5331	105.5	110.5	15.5805
5339	102.5	118.5	16.7085
5455	99.5	136.7	19.2747
5566	93.5	149.2	21.0372
5679	93	160	22.56
5788	88.5	164.8	23.2368
5898	84.5	160.3	22.6023
6006	84	155.5	21.77
6114	80.5	156.9	22.1229
6163	77	146.4	20.6424
6327	73.5	115.3	16.2573
6433	73.5	116.8	16.4688
6538	70.5	113.5	16.0035
6642	70	127.6	17.9916
6746	67.5	126.3	17.8083
6835	65	124.7	17.5827
6937	66.5	114.8	16.3016
7039	65	117.2	16.6424
7140	63.5	106.1	15.0662
7242	65	91.34	12.9703
7342	59.5	104.7	14.8674
7443	61.5	109.8	15.5916
7544	62	94.71	13.4488
7643	60.5	86.24	12.2461
7743	59	82.04	11.6497
7843	56.5	86.43	12.2731
7942	60	85.76	12.1779
8040	59.5	82.35	11.6937
8062	59.5	83.65	11.8783

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
8162	59	79.84	11.3373
8261	54.5	77.37	10.9865
8360	55	81.13	11.4393
8459	56.5	88.26	12.4447
8557	56	82.93	11.6931
8655	59	85	12.07
8753	57	79.26	11.1757
8851	55.5	73.3	10.4086
8949	59.5	60.12	8.53704
8949	58	65.14	10.3573

[3] P.N.Ngoc, S.Gueth, F.Deak, A.Kiss. 1980.

Ene,keV	dEne,MeV	Sig,mb	dSig,mb
14600	0.1	18.9	1.9

[4] F.Foroughi, J.Rossel. 1972.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
5850	65	135	27

[5] R.Bass, P.Haug, K.Kruger, B.Staginnus. 1966.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
4980	12.5	112	13.44
5005	12.5	114	13.68
5030	12.5	113	13.56
5055	12.5	108	12.96
5080	12.5	111	13.32
5105	12.5	120.5	14.46
5130	12.5	127.5	15.3
5155	12.5	127.5	15.3
5180	12.5	134	16.08
5205	12.5	129.2	15.504
5230	12.5	118.1	14.172
5255	12.5	121.8	14.616
5280	12.5	127.5	15.3
5305	12.5	143	17.16
5330	12.5	145.4	17.448
5355	12.5	159	19.08
5365	12.5	164.3	19.716
5390	12.5	168.1	20.172
5415	12.5	175	21
5440	12.5	167.1	20.052
5465	12.5	166.3	19.956
5490	12.5	166.3	19.956
5515	12.5	177.9	21.348
5540	12.5	186.3	22.356
5565	12.5	196	23.52
5590	12.5	190.2	22.824
5615	12.5	193.8	23.256
5640	12.5	204.5	24.54
5665	12.5	203.5	24.42
5690	12.5	200.7	24.084
5715	12.5	200.7	24.084
5740	12.5	200	24
5765	12.5	192.1	23.052
5790	12.5	199	23.88
5815	12.5	200	24
5840	12.5	214	25.68
5865	12.5	202.1	24.252
5890	12.5	192.1	23.052
5915	12.5	178.9	21.468
5940	12.5	169.3	20.316
5965	12.5	163	19.56
5990	12.5	175.6	21.072
6015	12.5	188.7	22.644
6040	12.5	207	24.84
6065	12.5	189.5	22.74
6090	12.5	181	21.72
6115	12.5	165.3	19.836
6140	12.5	179.3	21.516
6165	12.5	180.5	21.66
6190	12.5	176	21.12
6215	12.5	158.1	18.972
6240	12.5	149.9	17.988
6265	12.5	140	16.8
6290	12.5	134.1	16.092
6315	12.5	139.1	16.692
6340	12.5	143.2	17.184
6365	12.5	146	17.52
6390	12.5	141.2	16.944
6415	12.5	133.1	15.972
6440	12.5	132	15.84
6465	12.5	137.6	16.512
6490	12.5	140	16.8
6515	12.5	144.5	17.34
6540	12.5	145.3	17.436
6565	12.5	141.1	16.932

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
6590	12.5	135.8	16.296
6615	12.5	142.9	17.148
6640	12.5	145.2	17.424
6665	12.5	148.5	17.82
6690	12.5	148.1	17.772
6715	12.5	145.8	17.496
6740	12.5	144	17.28
6765	12.5	138	16.56
6790	12.5	145.2	17.424
6815	12.5	147.9	17.748
6840	12.5	155	18.6
6865	12.5	158.3	18.996
6890	12.5	161.1	19.332
6915	12.5	151.3	18.156
6940	12.5	147.4	17.688
6965	12.5	140.7	16.884
6990	12.5	147.8	17.736
7015	12.5	148.5	17.82
7040	12.5	148.5	17.82
7065	12.5	144.9	17.388
7090	12.5	147	17.64
7115	12.5	148.5	17.82
7140	12.5	143.2	17.184
7165	12.5	135.7	16.284
7190	12.5	131.7	15.804
7215	12.5	124.2	14.904
7240	12.5	114.9	13.788
7265	12.5	107.3	12.876
7290	12.5	110	13.2
7315	12.5	113.2	13.584
7340	12.5	119	14.28
7365	12.5	126.7	15.204
7390	12.5	134.9	16.188
7415	12.5	136.9	16.428
7440	12.5	137.2	16.464
7465	12.5	135	16.2
7490	12.5	128	15.36
7515	12.5	121.8	14.616
7540	12.5	118.8	14.256
7565	12.5	117	14.04
7590	12.5	110.3	13.236
7615	12.5	103.5	12.42
7640	12.5	100.8	12.096
7665	12.5	100.2	12.024
7690	12.5	95.6	11.472
7715	12.5	100.4	12.048
7740	12.5	100	12
7765	12.5	100.1	12.012
7790	12.5	96.5	11.58
7815	12.5	95.6	11.472
7840	12.5	97.3	11.676
7865	12.5	98.2	11.784
7890	12.5	99.4	11.928
7915	12.5	100.8	12.096
7940	12.5	100	12
7965	12.5	105.3	12.636
7990	12.5	102.3	12.276
8000	12.5	102.1	12.252
8025	12.5	99.3	11.916
8050	12.5	96	11.52
8075	12.5	91.8	11.016
8100	12.5	91.8	11.016
8125	12.5	90.3	10.836
8150	12.5	92.8	11.136
8175	12.5	90.5	10.86

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
8200	12.5	90.7	10.884
8225	12.5	92.2	11.064
8250	12.5	94.6	11.352
8275	12.5	96.5	11.58
8300	12.5	97.2	11.664
8325	12.5	97.2	11.664
8350	12.5	96.5	11.58
8375	12.5	96.5	11.58
8400	12.5	96.9	11.628
8425	12.5	95.5	11.46
8450	12.5	93	11.16
8475	12.5	94.7	11.364
8500	12.5	93	11.16
8525	12.5	90	10.8
8550	12.5	89.5	10.74
8575	12.5	88.1	10.572
8600	12.5	91.6	10.992
8625	12.5	94.7	11.364
8650	12.5	97.2	11.664
8675	12.5	101.8	12.216
8700	12.5	100.3	12.036
8725	12.5	99.2	11.904
8750	12.5	90.7	10.884
8775	12.5	91	10.92
8800	12.5	88.2	10.584
8825	12.5	86.1	10.332
8850	12.5	82.5	9.9
8875	12.5	80	9.6
8900	12.5	76	9.12
8925	12.5	70.7	8.484
8950	12.5	65.1	7.812
8975	12.5	61.3	7.356

[6] T.Knellwolf, J.Rossel. 1966.

Ene,keV	Ene,keV	Sig,mb	dSig,mb
6000	480	121	14

[7] R.Prasad, D.C.Sarkar. 1966.

Ene,MeV	Sig,mb	dSig,mb
14800	24	5

[8] J.Picard, C.F.Williamson. 1965.

Ene,MeV	Sig,mb	dSig,mb
14.18	15	5
14.89	32	6
15.67	33	6
16.15	28	5
17.33	21.7	5
18.49	10	3
18.92	16.5	3
19.61	17	3
20.19	25	5
20.63	26	5
21	16	3

[9] D.M.Smith, N.A.Bostrom, E.L.Hudspeth. 1958.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
3868	17.5	22.2	3.33
3893	17.5	25.9	3.885
3920	17.5	27.4	4.11
3945	17.5	31.7	4.755
3971	17.5	33.6	5.04
399	17.5	37.3	5.595
402	17.5	44.7	6.705
448	17.5	50.3	7.545
4072	17.5	51.3	7.695
409	17.5	53.9	8.085
4121	17.5	47.1	7.065
4145	17.5	48	7.2
4170	17.5	55	8.25
4195	17.5	70.5	10.575
4220	17.5	80.7	12.105
4244	17.5	94	14.1
4268	17.5	98.7	14.805
4292	17.5	103	15.45
4317	17.5	107	16.05
4339	17.5	117	17.55
4364	17.5	118	17.7
4388	17.5	113	16.95
4412	17.5	96	14.4
4436	17.5	89.4	13.41
4482	17.5	87	13.05
4506	17.5	85.7	12.855
4529	17.5	85.7	12.855
4552	17.5	80.1	12.015
4574	17.5	77.7	11.655
4598	17.5	79.7	11.955
4620	17.5	79.4	11.91
4643	17.5	78.2	11.73
4665	17.5	81	12.15
4689	17.5	88.5	13.275
4710	17.5	94.5	14.175
4733	17.5	114	17.1
4755	17.5	123	18.45
4778	17.5	125	18.75
4789	17.5	127	19.05
4810	17.5	124	18.6
4833	17.5	115	17.25
4856	17.5	115	17.25
4878	17.5	114	17.1
4900	17.5	112	16.8
4923	17.5	103	15.45
4945	17.5	93.1	13.965
4967	17.5	91.5	13.725
4990	17.5	91.9	13.785
5020	17.5	90.7	13.605
5035	17.5	90	13.5
5058	17.5	94.4	14.16
5076	17.5	97.5	14.625
5098	17.5	107	16.05
5121	17.5	114	17.1
5144	17.5	116	17.4
5165	17.5	113	16.95
5187	17.5	113	16.95
5207	17.5	99.8	14.97
5229	17.5	101	15.15
5250	17.5	108	16.2
5272	17.5	117	17.55
5294	17.5	126	18.9
5316	17.5	132	19.8
5336	17.5	142	21.3
5357	17.5	148	22.2

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
5380	17.5	150	22.5
5400	17.5	165	24.75
5423	17.5	152	22.8
5443	17.5	154	23.1
5464	17.5	155	23.25
5486	17.5	160	24
5509	17.5	171	25.65
5528	17.5	178	26.7
5551	17.5	186	27.9
5571	17.5	184	27.6
5592	17.5	186	27.9
5614	17.5	197	29.55
5636	17.5	197	29.55
5660	17.5	197	29.55
5702	17.5	203	30.45
5742	17.5	204	30.6
5785	17.5	203	30.45
5827	17.5	218	32.7
5869	17.5	209	31.35
5910	17.5	195	29.25
5950	17.5	171	25.65
5992	17.5	188	28.2
6033	17.5	215	32.25
6074	17.5	204	30.6
6115	17.5	220	33
6156	17.5	201	30.15

[10] N.A.Bostrom, E.L.Hudspeth, I.L.Morgan. 1955.

Ene,keV	Sig,mb
3330	5
3400	6
3470	11
3550	18
3590	24
3660	30
3700	36
3760	34
3820	29
3870	26
3910	27
3960	38
4020	47
4040	51
4070	61
4080	67
4110	73
4140	77
4190	108
4250	137
4280	156
4340	172
4390	162
4430	143
4470	142
4520	141
4550	133
4590	142
4640	156
4680	174
4700	198
4730	217
4750	206
4770	198
4810	203
4850	193
4880	185
4940	159
4980	154
5030	152
5070	149
5110	174
5130	182
5150	178
5180	173
5230	178
5270	191
5310	238
5350	238
5390	237
5440	252
5480	264
5520	274
5550	288
5590	310
5630	311
5660	307
5710	303
5740	308
5770	326
5810	313
5860	297

[11] J.B.Marion, R.M.Brugger. 1955.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
3090	15	1	0.4
3120	15	2	0.8
3160	15	3	1.2
3230	15	6	2.4
3300	15	13	5.2
3320	15	16	6.4
3360	15	22	8.8
3410	15	26	10.4
3440	15	28	11.2
3490	15	32	12.8
3500	15	33	13.2
3530	15	34	13.6
3550	15	36	14.4
3570	15	38	15.2
3580	15	43	17.2
3590	15	47	18.8
3610	15	46	18.4
3630	15	41	16.4
3650	15	43	17.2
3680	15	53	21.2
3720	15	54	21.6
3730	15	45	18
3750	15	42	16.8
3770	15	47	18.8
3790	15	46	18.4
3810	15	40	16
3830	15	39	15.6
3840	15	40	16
3860	15	43	17.2
3870	15	45	18
3890	15	50	20
3920	15	56	22.4
3930	15	59	23.6

[12] J.B.Marion, R.M.Brugger. 1955.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
3090	30	1	0.4
3160	30	2	0.8
3210	30	4	1.6
3260	30	8	3.2
3310	30	12	4.8
3360	30	17	6.8
3410	30	24	9.6
3460	30	28	11.2
3530	30	32	12.8
3580	30	37	14.8
3640	30	43	17.2
3700	30	42	16.8
3760	30	37	14.8
3820	30	38	15.2
3870	30	42	16.8
3930	30	49	19.6
4010	30	59	23.6
4060	30	78	31.2
4100	30	79	31.6
4120	30	72	28.8
4140	30	72	28.8
4160	30	79	31.6
4200	30	101	40.4
4250	30	122	48.8
4270	30	137	54.8
4330	30	150	60
4360	30	162	64.8
4390	30	163	65.2
4420	30	157	62.8
4460	30	135	54
4540	30	130	52
4600	30	129	51.6
4660	30	130	52
4740	30	142	56.8
4780	30	186	74.4
4850	30	184	73.6
4910	30	143	57.2

[13] J.B.Marion, R.M.Brugger. 1955.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
4700	50	132	52.8
4750	50	165	66
4800	50	188	75.2
4970	50	139	55.6
5160	50	135	54
5350	50	198	79.2
5540	50	238	95.2
5720	50	260	104
5960	50	270	108
6150	50	235	94
6350	50	205	82
6520	50	175	70
6700	50	174	69.6
6860	50	153	61.2
7050	50	142	56.8
7400	50	133	53.2
7730	50	132	52.8
7870	50	130	52
7940	50	134	53.6

[14] A.Bruggeman, W.Maenhaut, J.Hoste. 1979.

Ene,keV	Sig,mb	dSig,mb
2000	15.1	0.2

[15] G.Staudt. 1974.

Ene,MeV	dEne,MeV	Sig,mb	dSig,mb
13.9	0.075	27.5	5.3
15.6	0.125	17.5	3.4

[16] E.A.Davis, F.Gabbard, T.W.Bonner, R.Bass. 1961.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
2890	0	1.8	0.72
3040	0	1	0.4
3170	0	2.2	0.88
3310	0	2.8	1.12
3380	0	3.9	1.56
3450	0	7.5	3
3520	0	6.9	2.76
3580	0	20	8
3730	0	32	12.8
3880	0	43	17.2
4020	0	40	16
4070	0	52	20.8
4170	0	53	21.2
4230	40	70	28
4270	0	91	36.4
4300	0	97	38.8
4330	0	98	39.2
4390	0	95	38
4430	0	89	35.6
4470	0	76	30.4
4510	0	79	31.6
4550	0	77	30.8
4590	0	78	31.2
4620	0	76	30.4
4670	0	88	35.2
4710	0	96	38.4
4740	0	103	41.2
4780	0	106	42.4
4830	0	104	41.6
4870	0	99	39.6
4910	0	94	37.6
4950	0	84	33.6
4990	0	83	33.2
5040	0	78	31.2
5080	0	85	34
5170	0	78	31.2
5270	0	87	30.45
5330	0	89	31.15
5420	0	97	33.95
5460	0	107	37.45
5500	0	124	43.4
5600	0	131	45.85
5640	0	132	46.2
5790	0	135	47.25
5880	0	127	44.45
5900	0	135	47.25
6000	42.5	118	41.3
6100	0	119	41.65
6220	0	96	33.6
6340	0	87	30.45
6430	0	79	27.65
6510	0	90	31.5
6640	0	92	32.2
6760	0	96	33.6
6880	0	100	35
7030	0	98	34.3
7100	0	94	32.9
7170	0	87	30.45
7290	0	77	26.95
7330	0	81	28.35
7440	0	91	31.85
7470	0	88	30.8
7580	0	71	24.85
7620	0	73	25.55
7670	0	24	8.4

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
7730	0	71	24.85
7770	0	73	25.55
7890	0	75	26.25
8050	0	74	25.9
8200	60	81	28.35

Secciones eficaces de la reacción 9-F-19(n,g)9-F-20.

De la misma manera que en el apartado anterior, se recogen en las sucesivas tablas la siguiente información para la reacción 9-F-19(n,g)9-F-20,

- Fuente bibigráfica con referencia expresa a los autores y al año de la publicación.
- Tablas con las siguientes columnas:
  - Energía de los neutrones E, en keV. (Ene,keV).
  - Intervalo de error para la energía de los neutrones. (dEne,keV)
  - Sección eficaz σ, expresada en mb, de la reacción. (Sig,mb).
  - Intervalo de error de la sección eficaz. (dSig,mb)

[17] R.L.Macklin, J.H.Gibbons, T.Inada. 1963.

#Ene,keV	Sig,mb	dSig,mb
11.7	1.75	0
12.8	4.8	0
13.8	4.6	2.5
15.2	9.7	3.5
16.4	2.8	1
18.4	3	3.6
20.7	3.5	1.4
23.2	10	2
26	11.4	2
29.2	6.2	1.3
33.9	0.7	0.3
39	0.8	0.3

[18] J.H.Gibbons, R.L.Macklin, P.D.Miller, J.H.Neiler. 1961.

#Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb	dSig,mb
30	3.5	4.5	1

[19] F.Gabbard, R.H.Davis, T.W.Bonner. 1959.

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb
16	0	3.6
18	0	3.9
19	0	4.1
20	0	6.2
22	0	16.2
23	0	17
26	0	20
27	0	18.9
28	0	17
30	0	11.6
31	0	8.8
33	0	5
36	0	3.9
45	0	4.2
50	0	5.8
53	0	5.7
57	0	4.1
60	0	1.7
65	0	0.8
69	0	1.2
73	0	0.9
77	0	1.1
82	0	0.71
85	0	0.79
89	0	1.2
89	0	1.4
93	0	1.91
98	0	1.91
100	0	2.4
106	0	2
110	0	1.5
115	0	1.2
121	0	1.3
124	0	0.96
130	0	0.67
132	0	0.78
138	0	0.78
140	0	0.5
150	0	0.35
156	0	0.28
156	0	0.32
158	0	0.27
160	0	0.32
161	0	0.25
168	0	0.44
177	0	0.57
182	0	0.56
186	0	0.5
194	0	0.36
206	0	0.47
216	0	0.39
217	0	0.4
228	0	0.41
239	0	0.42
250	0	0.5
252	0	0.58
259	0	1.005
259	0	0.96
263	0	1.25
264	0	1.11
269	0	1.32
273	0	0.295
276	0	0.82
277	0	0.96
285	0	0.75

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb
285	0	0.68
293	0	0.64
294	0	0.6
298	0	0.5
300	0	0.49
303	0	0.71
303	0	0.65
306	0	0.72
310	0	0.67
314	0	0.68
314	0	0.65
320	0	0.465
322	0	0.47
328	0	0.44
328	0	0.46
332	0	0.37
337	0	0.38
341	0	0.3
346	0	0.28
350	0	0.245
358	0	0.3
368	0	0.295
374	0	0.36
378	0	0.55
381	0	0.87
386	0	0.96
391	0	0.875
396	0	0.66
400	0	0.57
404	0	0.38
413	0	0.36
418	0	0.32
422	0	0.34
426	0	0.36
432	0	0.33
436	0	0.29
440	0	0.26
444	0	0.23
446	0	0.265
454	0	0.15
458	0	0.21
480	0	0.14
487	0	0.195
494	0	0.18
496	0	0.27
502	0	0.35
506	0	0.24
522	0	0.17
532	0	0.15
544	0	0.15
545	0	0.175
562	0	0.2
567	0	0.24
568	17.5	0.21
577	0	0.225
583	17.5	0.255
586	0	0.39
589	0	0.66
592	0	1.025
593	17.5	0.425
594	0	1.23
597	0	1.39
599	0	1.44
602	0	1.41
604	0	1.04

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb
605	17.5	0.87
608	0	0.71
613	0	0.46
616	0	0.29
620	17.5	0.575
620	0	0.27
628	0	0.21
630	17.5	0.44
640	17.5	0.383
640	0	0.18
675	17.5	0.27
705	17.5	0.175
729	17.5	0.193
740	17.5	0.2
745	17.5	0.208
758	17.5	0.213
765	17.5	0.22
775	17.5	0.2
782	17.5	0.18
800	17.5	0.16
818	17.5	0.16
845	17.5	0.185
865	17.5	0.208
875	17.5	0.205
885	17.5	0.185
906	17.5	0.158
920	17.5	0.15
955	17.5	0.138
988	17.5	0.1
1010	17.5	0.1
1043	17.5	0.075
1080	17.5	0.08
1100	17.5	0.095
1110	17.5	0.138
1125	17.5	0.115
1135	17.5	0.15
1155	17.5	0.12
1170	17.5	0.1
1190	17.5	0.1
1230	17.5	0.101
1243	17.5	0.13
1255	17.5	0.14
1265	17.5	0.2
1275	17.5	0.265
1285	17.5	0.305
1295	17.5	0.325
1305	17.5	0.31
1315	17.5	0.25
1325	17.5	0.245
1330	17.5	0.175
1340	17.5	0.138
1358	17.5	0.115
1370	17.5	0.1
1388	17.5	0.075
1400	17.5	0.075
1438	17.5	0.08
1458	17.5	0.08
1495	17.5	0.08
1540	17.5	0.08
1556	17.5	0.081
1580	17.5	0.095
1595	17.5	0.088
1618	17.5	0.1
1638	17.5	0.11
1660	17.5	0.1

Ene,keV	dEne,keV	Sig,mb
1680	17.5	0.088
1700	17.5	0.088
1740	17.5	0.065
1780	17.5	0.06
1828	17.5	0.07
1870	17.5	0.07

[20] L.V.Groshev, B.P.Ad`yasevich, A.M.Demidov. 1955.

#Ene,eV	Sig,mb
0.0253	9

[21] #AUTHORS R.L.Henkel, H.H.Barschall. 1950.

#Ene,keV	Sig,mb
240	0.3
242	0.395
252	0.425
257	0.6
258	0.89
259	1.15
270	1.22
275	1.15
278	0.82
285	0.59
320	0.3
365	0.298
535	0.102
580	0.132
580	0.415
595	1.1
600	1.3
615	0.71
620	0.465
620	0.3
660	0.25

[22] S.S.Glickstein, R.G.Winter. 1963.

#Ene,eV	Sig,mb	dSig,mb
0.0253	10.09	0.7

[23] S.Raman, E.K.Warburton, J.W.Starner, E.T.Jurney, J.E.Lynn, P.Tikkanen, J.Keinonen. 1996.

#Ene,eV	Sig,mb	dSig,mb
0.0253	9.51	0.09

[24] L.Seren, H.N.Friedlander, S.H.Turkel. 1947.

#Ene,eV	Sig,mb	dSig,mb
0.0253	9.4	1.88

[25] S.Raman, E.K.Warburton, J.W.Starner, E.T.Jurney, J.E.Lynn, P.Tikkanen, J.Keinonen. 1996.

#Ene,keV	Sig,mb	dSig,mb
0	0.202	0.013
0	0.151	0.02
0	1.16	0.06
0	0.004	0.001
0	0.003	0.001
0	0.009	0.002
0	0.94	0.04
0	0.009	0.002
0	0.264	0.015
0	0.045	0.003
0	0.086	0.005
0	0.009	0.002
0	0.76	0.03
0	0.023	0.002
0	0.026	0.003
0	0.006	0.002
0	0.016	0.002
0	0.61	0.03
0	0.013	0.002
0	0.073	0.005
0	0.09	0.009
0	0.01	0.003
0	0.047	0.004
0	0.015	0.002
0	0.014	0.002
0	0.196	0.009
0	0.091	0.006
0	0.197	0.008
0	0.038	0.004
0	0.07	0.005
0	0.004	0.002
0	0.297	0.012
0	0.02	0.003
0	0.189	0.008
0	0.007	0.002
0	0.061	0.004
0	0.026	0.003
0	0.061	0.005
0	0.005	0.001
0	0.72	0.03
0	0.014	0.003
0	0.009	0.002
0	0.29	0.012
0	0.178	0.007
0	0.021	0.003
0	0.087	0.006
0	0.058	0.005
0	0.106	0.006
0	0.018	0.003
0	0.012	0.003
0	0.008	0.003
0	0.441	0.016
0	0.024	0.003
0	0.01	0.003
0	0.036	0.003
0	0.007	0.002
0	0.054	0.004
0	0.017	0.003
0	0.028	0.003
0	0.167	0.006
0	0.108	0.006
0	0.006	0.001
0	0.093	0.005
0	0.003	0.001
0	0.018	0.003

#Ene,keV	Sig,mb	dSig,mb
0	0.047	0.004
0	0.522	0.02
0	0.008	0.002
0	0.006	0.001
0	0.023	0.004
0	0.052	0.004
0	0.054	0.004
0	0.189	0.008
0	0.009	0.002
0	0.007	0.002
0	0.059	0.006
0	0.021	0.003
0	0.027	0.003
0	0.62	0.024
0	0.422	0.02
0	0.008	0.002
0	0.236	0.01
0	0.019	0.003
0	0.119	0.005
0	0.41	0.016
0	0.052	0.004
0	0.138	0.006
0	0.008	0.002
0	0.097	0.01
0	0.011	0.003
0	0.09	0.03
0	0.035	0.003
0	0.078	0.006
0	0.008	0.002
0	0.013	0.002
0	0.014	0.003
0	0.177	0.009
0	0.044	0.003
4.20116E-40	0.097	0.005
4.20119E-40	0.004	0.001
4.20158E-40	0.016	0.003
1.35632E-25	0.005	0.001
1.35632E-25	0.073	0.006
1.35632E-25	0.24	0.009
8.88875E-21	0.005	0.002
5.21569E-17	0.011	0.002
1.61436E-10	0.041	0.003
1.61436E-10	0.133	0.006
2.53E-08	0.44	0.04
4E-08	0.94	0.04
0.00016678	0.94	0.04
0.000193271	0.58	0.03
2.25973E+14	0.005	0.002
4.96062E+22	0.005	0.001
7.50188E+22	0.068	0.005

[26] T.J.Kennett, W.V.Prestwich, J.S.Tsai. 1987.

#Ene,MeV	Sig,mb
0	0.26
2.53E-08	0.14
705.58	0.19
739477	0.07