

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**Master de Ciencia y Tecnología de Materiales**

---

**PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS MATERIALES  
DEL SECTOR METALÚRGICO PARA SU POSTERIOR  
APLICACIÓN EN MICROONDAS.**

---

**Autor: Antonio Fernández González**

**Tutor: Inés Fernández Pariente, Sara María Andrés Vizán**

**Fecha de presentación: 23 de Julio de 2014 en Oviedo.**





## ÍNDICE GENERAL.

<b>OBSERVACIONES:</b> .....	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FÓRMULAS.</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ESTADOS DEL ARTE.</b> .....	<b>2</b>
a. Introducción: .....	2
b. Establecer una metodología: .....	3
c. Situación:.....	4
d. Variables de estudio: .....	7
e. Principales estudios bajo microondas: .....	8
f. Que propiedades han sido medidas: .....	10
g. Como han sido medidas: .....	13
h. Que interpretaciones se han hecho: .....	13
i. Vacíos de información: .....	14
j. Conclusiones: .....	14
<b>3. PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS MATERIALES.</b> .....	<b>16</b>
a. Concepto material dieléctrico.....	16
b. Características dieléctricas de los materiales. ....	16
c. Concepto onda electromagnética. ....	17
d. Propiedades dieléctricas. ....	20
e. Mecanismos de pérdida.....	26
f. Concepto de microondas: .....	30
<b>4. MEDIDAS PROPIEDADES DIELECTRICAS.</b> .....	<b>34</b>
a. Definiciones: .....	34
b. Funcionamiento dieléctrico: .....	36
c. Principales fabricantes: .....	37
d. Sistemas de medida: .....	38
e. Elección del método según las necesidades: .....	47
f. Ensayos: .....	48
g. Conocimiento de la reflexión de la onda:.....	57
h. Conclusiones: .....	58



<b>5. GUÍA METODOLÓGICA.....</b>	<b>62</b>
a. Introducción: .....	62
b. Diagrama de flujo:.....	65
c. Explicación en detalle del diagrama de flujo: .....	67
<b>6. CALENTAMIENTOS EXPERIMENTADOS.....</b>	<b>72</b>
a. Introducción: .....	72
b. Tipo de calentamiento.....	73
c. Tiempos de tratamiento.....	77
d. Experimentación: .....	77
<b>7. CONCLUSIONES:.....</b>	<b>81</b>
<b>8. ANEXOS:.....</b>	<b>82</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA:.....</b>	<b>103</b>
Instituciones: .....	103

## AGRADECIMIENTOS.

A Sara María y Juan José por su tiempo y paciencia conmigo en mi tiempo en Arcelor-Mittal.

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Ilustración 1. Gráfica estados del arte. ....	5
Ilustración 2. Línea temporal tecnología de microondas. ....	6
Ilustración 3. Esquema onda electromagnética. ....	17
Ilustración 4. Clases de comportamiento onda-material. ....	19
Ilustración 5. Espectro electromagnético ....	20
Ilustración 6. Representación ortogonal de la permitividad. ....	22
Ilustración 7. Orientación de los dominios magnéticos al someter el material a un campo magnético. ....	24
Ilustración 8. Relación permitividad-w ....	28
Ilustración 9. Frecuencia de relajación. ....	29
Ilustración 10. Relación constante dieléctrica- reflexión. ....	29
Ilustración 11. Diagrama Cole-Cole. ....	30
Ilustración 12. Comparativa entre ondas electromagnéticas. ....	31
Ilustración 13. Comparación simple de permeabilidades para: ferromagnéticos ( $\mu_f$ ), paramagnéticos ( $\mu_p$ ), diamagnéticos ( $\mu_d$ ) y el vacío ( $\mu_0$ ). ....	35
Ilustración 14. Pérdida máxima. ....	37
Ilustración 15. Esquema analizador vectorial de redes. ....	39
Ilustración 16. Comparativa de frecuencias con sistemas de medida. ....	39
Ilustración 17. Imagen del sistema de medida. ....	40
Ilustración 18. Intervalo de frecuencias. ....	41
Ilustración 19. Comparativa medidores. ....	42
Ilustración 20. Funcionamiento dieléctrico. Condensador. ....	46
Ilustración 21. Circuito complementario al condensador. ....	46
Ilustración 22. Funcionamiento dieléctrico. Bobina. ....	47
Ilustración 23. Comparativa de ensayos. ....	48
Ilustración 24. Esquema funcionamiento sonda coaxial. ....	50
Ilustración 25. Accesorios sonda coaxial. ....	50
Ilustración 26. Sonda de temperatura. ....	50
Ilustración 27. Sonda ensayos destructivos. ....	51
Ilustración 28. Sonda intermedia. ....	51
Ilustración 29. Esquema de funcionamiento de línea de transmisión. ....	52
Ilustración 30. Guías de línea de transmisión. ....	53
Ilustración 31. Esquema de funcionamiento de espacio libre. ....	54
Ilustración 32. Ejemplo medida. ....	56
Ilustración 33. Esquema ensayo discos paralelos. ....	57
Ilustración 34. Reflexión de la onda. ....	58
Ilustración 35. Comparativa total. ....	61
Ilustración 36. Ejemplo nube de dispersión. ....	65
Ilustración 37. Mapeado ensayos dieléctricos. ....	69
Ilustración 38. Movimiento bipolar. ....	74
Ilustración 39- Clases de calentamiento en función de la frecuencia. ....	74
Ilustración 40. Comparativa calentamientos. ....	75

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Clasificación de los materiales según su naturaleza dieléctrica. ....	17
Tabla 2. Tabla de las distintas clases de ondas electromagnéticas.....	32
Tabla 3. Rango de frecuencia de los microondas. ....	32
Tabla 4. Accesorios 1. ....	43
Tabla 5. Accesorios 2. ....	44
Tabla 6. Comparativa entre ensayos. ....	60
Tabla 7. Tabla guía metódica. ....	64
Tabla 8. Ilustración técnica espacio libre. ....	70
Tabla 9. Ensayo calentamiento 1.....	78
Tabla 10. Ensayo calentamiento 2.....	78
Tabla 11. Ensayo calentamiento 3.....	79
Tabla 12. Ensayo calentamiento 4.....	79
Tabla 13. Ensayo calentamiento 5.....	80

## ÍNDICE DE FÓRMULAS.

( 1 Refracción. Velocidad C.....	18
( 2 Refracción. Velocidad V.....	18
( 3 Comportamiento onda-material .....	19
( 4 Permeabilidad 1 .....	22
( 5 Permeabilidad 2 .....	22
( 6 Relación campo permeabilidad 1.....	24
( 7 Relación campo permeabilidad 2.....	25
( 8 Transformación energía en calor. ....	25
( 9 Penetración de la onda .....	26
( 10 Permitividad.....	27
( 11 Constante frecuencia de relajación .....	28
( 12 Permitividad.....	34
( 13 Permeabilidad .....	34
( 14 Factor de pérdida.....	35
( 15 Constante frecuencia de relajación .....	36
( 16 Permitividad- Condensador .....	45
( 17 Permeabilidad- Bobina.....	46
( 18 Ecuaciones dieléctricas .....	57
( 19 Resonancia onda. ....	61

## **PALABRAS CLAVE.**

Arcelor-Mittal, dieléctrico, microondas, propiedades dieléctricas, mineral de hierro, coque, calentamiento, constante dieléctrica, permitividad, permeabilidad, factor de calidad, tiempo de relajación, molienda.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

El conocimiento de las propiedades dieléctricas es fundamental para entender el comportamiento que experimentará un material al estar sometido a un campo electromagnético.

El presente documento está enfocado en conocer los principales mecanismos dieléctricos y las constantes dieléctricas; para ello, se implantará un guía metodológica y se explicarán los ensayos existentes que ayuden a entender el cálculo de estas propiedades.

Paralelamente, y a raíz de estudios realizados se intentará fijar los puntos que se acaban de presentar, centrando el foco en las propiedades dieléctricas de los minerales de hierro y el coque metalúrgico apoyándose en el calentamiento que experimentan al ser tratados por microondas.

La tecnología de microondas se lleva utilizando desde principios del siglo pasado y es algo con lo que convivimos habitualmente. Sin embargo están apareciendo nuevos campos de aplicación y se están empezando a implantar en los procesos productivos con un futuro prometedor, aunque presenta inconvenientes. Uno es la frontera de impacto, pasar del laboratorio al mercado, segundo el necesario conocimiento de las propiedades dieléctricas de los materiales. Son éstas las que determinarán si un material es apto o no para el tratamiento con microondas y son variables en función de las propiedades físicas y químicas del material, temperatura y frecuencia de la onda.

Resumiendo, con el trabajo se pretende dar a conocer que son los microondas, las propiedades dieléctricas de los materiales siderúrgicos nombrados, estudios, campos de investigación existentes y aplicaciones existentes que ayude a fijar una guía que permita conocer las propiedades dieléctricas y entender el comportamiento y calentamiento de los minerales de hierro y coque al ser tratados con microondas.

## 2. ESTADOS DEL ARTE.

### a. Introducción:

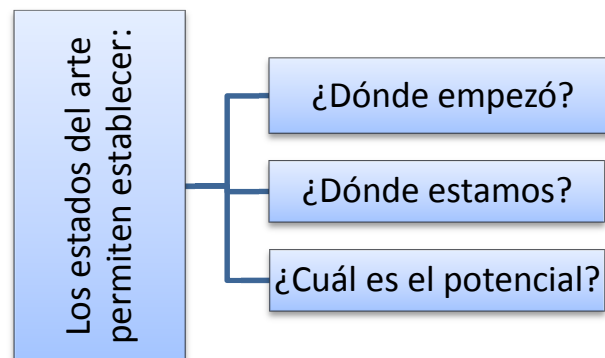
#### ¿Por qué del estado del arte?

Se refiere a la búsqueda de la información existente sobre una línea de investigación para su posterior documentación en un campo de estudio del que se quiera adquirir conocimiento, para que esté completo ha de responder a las siguientes preguntas:

- ¿Qué se estudia?
- ¿Qué se mide?
- ¿Dónde?
- ¿Quiénes y cómo?
- ¿Para qué?

El objetivo del trabajo es la búsqueda de la información de las propiedades dieléctricas<sup>1</sup> y los estudios existentes en el calentamiento bajo microondas de los materiales siderúrgicos<sup>2</sup>, centrándose en su posterior molienda. Es decir, ir tras las huellas de las propiedades dieléctricas de los materiales siderúrgicos que explique el calentamiento bajo esta radiación.

En el siguiente diagrama se asientan las tres ramas principales.



<sup>1</sup> Propiedades físicas de los materiales al ser sometidos a un campo electromagnético externo.

<sup>2</sup> Minerales de hierro y coque metalúrgico.

Para ello, nos hemos apoyado en dos clases de documentos:

1. Documentación de las principales casas comerciales fabricantes de medidores dieléctricos para el cálculo de las propiedades dieléctricas.
2. Búsqueda de información de los experimentos realizados por Universidades y centros de investigación que explique el comportamiento dieléctrico y el impacto y posibles futuras aplicaciones del uso de microondas.

Todos estos documentos han de ser capaces de fijar y entender el mecanismo dieléctrico.

### **b. Establecer una metodología:**

La información encontrada fue abundante, sin embargo se observaron vacíos de información en los aspectos importantes. Para ello, el primer paso será elegir los documentos más adecuados.

Aun así se encontró suficiente información para fijar una serie de pautas de trabajo. Una metodología (identificación de la información, contextualización de la misma, clasificación de la información, categorización de la información, interpretación de la información, consolidación de una síntesis y realización de una base de datos). Profundizando en los puntos anteriores y para facilitar el proceso de recolección de información se siguieron una serie de pautas, son las siguientes:

1. Búsqueda de información relacionada con el efecto de los microondas en los materiales y posibles aplicaciones.
2. Búsqueda de información del calentamiento con microondas para usos en la minería. Molienda asistida de por microondas.
3. Conocimiento de las principales dieléctricas.
4. Cálculo de las constantes dieléctricas.
5. Separación de los resultados en función de los minerales de hierro y coque.
6. Estudio de los calentamientos y fenómenos asociados a éstos.
7. Comprensión de que propiedades dieléctricas que provocan el calentamiento.
8. Profundización en el conocimiento de las propiedades dieléctricas apoyando la documentación en las técnicas de medida y fabricantes.

El trabajo desarrollado en Arcelor-Mittal durante un periodo de tres meses se centró en la recopilación de información y exposición de ésta para llegar a una serie de conclusiones que ayuden a los trabajadores de la empresa conocer y calcular las propiedades dieléctricas de los materiales siderúrgicos y prever su calentamiento bajo microondas.



La gran mayoría de la documentación encontrada se apoya en el calentamiento por microondas para dar a conocer las propiedades dieléctricas y los resultados al ser calentados, sumando, en algunos casos, posibles aplicaciones pero sin salir de la escala de laboratorio.

Respecto a las propiedades dieléctricas, fundamentales para conocer el calentamiento ocupa un protagonismo secundario, eran nombradas y cuantificadas sin explicar cómo habían sido calculadas ni la variabilidad que pueden llegar a presentar.

Para encontrar trabajos que expliquen las propiedades dieléctricas en profundidad y el mecanismo dieléctrico siempre serán sin estudios o aplicaciones paralelas. Es decir, ensayos puramente dieléctricos.

Por ello, en el presente trabajo a parte de estudiar el estado del arte se intentará dar unas normativas para dar a conocer las propiedades dieléctricas con los distintos ensayos existentes, que ayude a conocer los calentamientos que experimentarán los materiales en función de su procedencia y fijar unos objetivos de producción bajo molienda que ayude a reducir los costes productivos en Arcelor-Mittal.

Por lo tanto, se puede definir como objetivos generales:

- Estudiar las propiedades dieléctricas de los materiales.
- Conocer que factores pueden afectar a las propiedades dieléctricas.
- Fijar unos ensayos en función de las características materiales.
- Estudio de los calentamientos experimentados.

Para facilitar la comprensión de los datos debido a la densidad y volumen de estudios realizados se estudiarán por separado los minerales de hierro y el coque, también serán nombrados otros campos de estudio que ayuden a fijar al lector en que punto se encuentra la tecnología y mostrarle el potencial de la misma.

### **c. Situación:**

Una vez fijada la forma de trabajar, el estado del arte ha de responder a las preguntas que fueron introducidas en el apartado anterior, en la siguiente imagen se muestra:



Ilustración 1. Gráfica estados del arte.

Todos estos apartados serán contestados a lo largo del presente apartado del trabajo, el objetivo es que el lector adquiera una perspectiva del trabajo y en que punto se encuentra la investigación.

#### I. Punto de partida, ¿cuándo empezó?

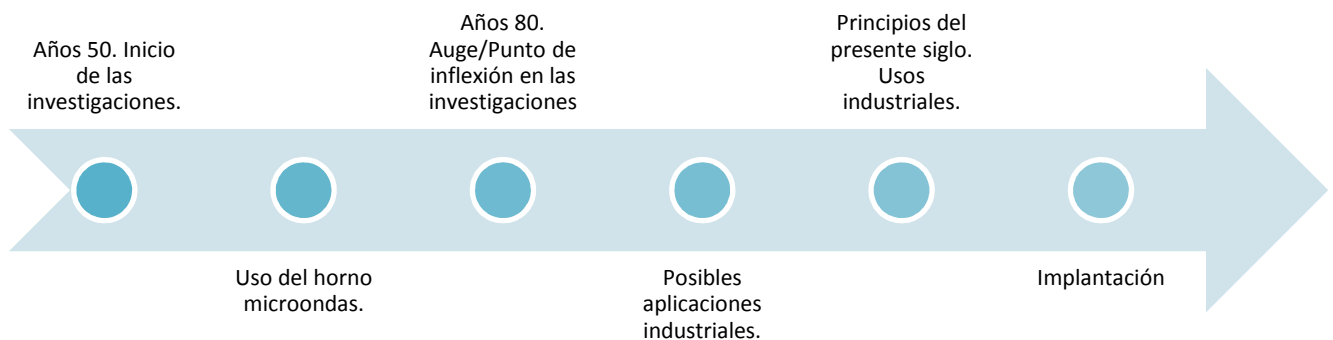
El grueso de las propiedades dieléctricas es conocido desde hace bastante tiempo, si bien, en el objetivo de este trabajo es conocer las propiedades dieléctricas asociadas a un posterior calentamiento por microondas.

A mediados del siglo pasado se empezaron a ensayar distintos materiales en campos con un posible uso industrial (alimentación, tratamiento de residuos, etc).

Centrando la atención en la minería se empezaron a ensayar minerales de hierro, coque, menas del cobre y otros materiales. El objetivo era generar una base de datos de las propiedades dieléctricas. Desde muy temprano se observó la variabilidad de los resultados, por eso, siempre se hace referencia a un estado de la materia y temperatura para referirse a ellas. Paralelamente a las mediciones se mejoran las técnicas de medida, tanto con la implantación de nuevos ensayos como dispositivos de medida (esto será explicado más adelante). Así se fueron calculando las propiedades dieléctricas del grueso de los materiales y se mejoró el conocimiento de las mismas.

Respecto al calentamiento bajo microondas ocurrió algo parecido al cálculo de las propiedades dieléctricas. Se empezó ensayando con microondas comerciales, limitados en potencia y frecuencia, así los resultados siempre estaban fijados en un rango de frecuencias bastante limitado (2.45 GHz) y unas potencias que oscilaban entre los 500 y 1000W, era en los tiempos de exposición y en los ciclos donde los experimentos tenían cabida. Según avanzó la tecnología y los ensayos demostraron su posible implantación industrial, se empezaron a construir magnetrones acordes con las necesidades, aunque también con un rango de frecuencias de microondas elevado. Así se estudió el calentamiento producido por el efecto de las microondas, clasificando los materiales e hiperactivos, activos y no activos.

También se calcularon los rangos de aumento de temperatura en ( $^{\circ}\text{C/s}$ ) y las temperaturas máximas alcanzadas ( $^{\circ}\text{C}$  o  $^{\circ}\text{F}$ ) en función del tiempo de exposición fijando la frecuencia y la potencia.



**Ilustración 2. Línea temporal tecnología de microondas.**

## II. Consolidación, ¿dónde estamos?

Dentro de la línea temporal, estamos entre los usos industriales y la completa implantación de la tecnología.

Actualmente se tiene conocimiento de las propiedades dieléctricas de la mayoría de los materiales, pero como se ha comentado bajo unas condiciones dadas. Con el paso de los años y ensayos se sabe que la temperatura y las frecuencias son las principales razones de la variabilidad de éstas. A su vez, también se ha documentados los principales mecanismos dieléctricos.

Respecto al calentamiento bajo microondas, como ya se ha comentado, se empezó a escala laboratorio con hornos comerciales estudiando toda clase de materiales con posibles usos industriales, desde alimentos a minería. Siendo en la década de los ochenta del siglo pasado donde de verdad se produjo el punto de inflexión y se realizaron multitud de investigaciones. Se intentó crear una base de datos lo suficientemente amplia que ayudará a comprender los mecanismos de calentamiento.

### III. Futuro, ¿cuál es el potencial?

El potencial es enorme, al menos sobre el papel, el verdadero reto es pasar de la escala laboratorio a un uso industrial de la tecnología. Cada campo se está centrando en el cálculo de las propiedades dieléctricas para su posterior irradiación bajo microondas, intentando fijar los tiempos de exposición y la frontera de rentabilidad. Ese es el verdadero reto. Así como fijar una correcta calibración de la frecuencia.

A continuación se profundizará en lo dicho hasta ahora.

## **d. Variables de estudio:**

Hay multitud de estudios relacionados con las propiedades dieléctricas de diversos materiales, hay estudio de cerámicos, “composites”, aleaciones etc. Dado que el volumen de investigación es muy elevado la base del trabajo se centraran en el estudio de las propiedades dieléctricas del coque/carbón y los minerales de hierro; a su vez también se documentará el calentamiento bajo irradiación de microondas los materiales mencionados.

### I. Propiedades dieléctricas:

El estudio de las propiedades dieléctricas de los materiales no es nuevo.

La información existente es amplia y diversa por el futuro que ofrece la tecnología de calentamiento bajo microondas, basta con ir a internet y observar la cantidad de trabajos e investigaciones relacionados con las propiedades dieléctricas. Siempre a una temperatura fija y en un estado de la materia conocido (hay que tener claro este punto). Como se explicará más adelante las propiedades dieléctricas son variables y dependen fundamentalmente de la composición/forma del material, de la temperatura a la que se encuentre y por último, a la frecuencia con la que sea irradiado. Es decir, las propiedades dieléctricas tienen dos derivadas, una del material y otra ajeno a éste.

Esta es la razón de porque las propiedades dieléctricas son difíciles de medir y sus valores fluctúan tanto. Esta es la razón porque en muchos de los documentos estudiados, aunque el campo de estudio y los materiales ensayados sean los mismos no suele haber coincidencias en las mediciones. Pequeñas variaciones (composición, impurezas, contenido en agua, temperatura, frecuencia etc) o una mala calibración de los ensayos son las responsables de estas no coincidencias.

Esto implica que para cada proceso sea hace necesario realizar previamente un ensayo que ayude a fijar las propiedades dieléctricas.

Como se explicará más adelante no es sencillo medirlas y se requiere un equipo especializado y una técnica complicada. Existen una serie de compañías especializadas en equipos de medida y ensayos que ayudan a comprender las propiedades dieléctricas y cual es su función.

Además se cree necesario realizar varias mediciones para realizar una nueva de dispersión que ayude a calcular una media con su desviación que ayude a “fijar” las propiedades dieléctricas del material en función de una temperatura y frecuencia.

## II. Calentamiento por microondas:

Este apartado está mucho más documentado, sin embargo, está íntimamente relacionado con lo expuesto anteriormente. Normalmente los estudios realizados no se preocupan en profundizar en qué clase de dieléctrico es y cuanto de eficiente es un material al ser irradiado, en función de los calentamientos experimentados catalogan a los materiales. Se hace un ejercicio de ingeniería inversa, al calentar un material bajo una onda electromagnética se puede saber si éste es dieléctrico al ser capaz de absorber la onda electromagnética y producir un campo interno. También, y en función del tipo de calentamiento y la velocidad que experimenta éste se puede saber, no con exactitud, que constante dieléctrica<sup>3</sup> tiene (factor de pérdida) fundamental en este campo de estudio.

El calentamiento también dependen de la microestructura del material, será explicado más adelante.

### **e. Principales estudios bajo microondas:**

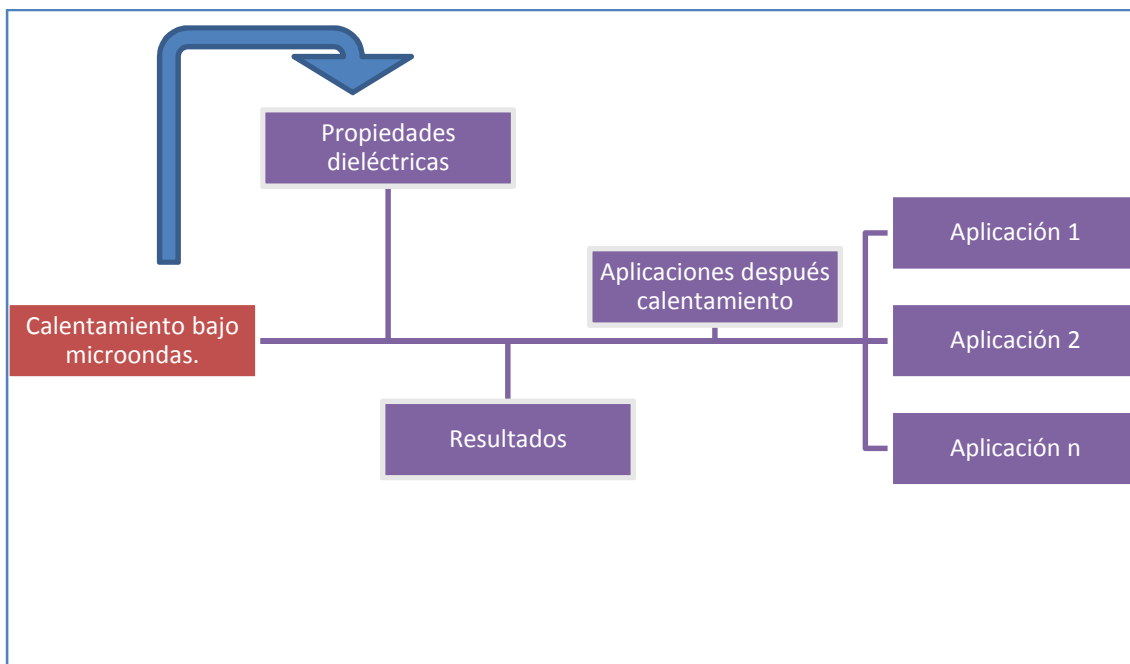
---

<sup>3</sup> Propiedad dieléctrica de los materiales dependiente del campo eléctrico de una onda electromagnética. Se explicará más en profundidad en otros apartados.

El título de este apartado no está elegido al azar. La razón es que cuando se busca información sobre “propiedades dieléctricas”, “características de las propiedades dieléctricas” o “propiedades dieléctricas de los materiales” siempre están condicionadas con un estudio o un campo de investigación y puesto que la meta de Arcelor-Mittal es el calentamiento bajo ondas electromagnéticas con frecuencia de microondas solo se hará mención a las obras con dicha frecuencia.

Al ser una tecnología relativamente nueva fuera de su uso clásico (condensadores), han surgido campos de investigación. Los mecanismos dieléctricos y cómo actúa una onda electromagnética no son conocidos en profundidad, al menos no se sabe con exactitud todos los procesos que intervienen.

Se lleva estudiando las consecuencias del calentamiento por microondas desde el siglo pasado. Inicialmente se han clasificado los materiales en función de su naturaleza dieléctrica (absorbentes, transparentes y conductores) y posteriormente su comportamiento al ser irradiados bajo microondas intentando conocer el comportamiento de cada uno de ellos [Didier Stuerger, 2002].



Con el gráfico se hace una clasificación de la información, se intenta explicar que en la mayoría de los experimentos utilizan el calentamiento para calcular el comportamiento dieléctrico, en vez de calcular las propiedades dieléctricas para predecir que clase de calentamiento se va a producir, siguen el camino inverso.

Un artículo que puede ayudar al lector comprender la profundidad del uso de microondas y las posibles aplicaciones es “Microwave heating applications in environmental engineering”, [D.A. Jones, T.P. Lelyveld, S.D. Mavrofidis, S.W. Kingman, N.J. Miles, 2001].

La mayoría de los estudios se centran en el calentamiento por microondas y sus posibles aplicaciones tras el tratamiento y siempre a escala de laboratorio con ciertos parámetros fijos.

A continuación se muestran algunos campos de estudio:

- a. Recuperación de suelos contaminados.
- b. Regeneración de carbones activados.
- c. GAC.
- d. Tratamientos de residuos.
- e. Tratamientos de alimentos.
- f. Secado.
- g. Molienda asistida por microondas.

Siendo el último punto el de interés dentro de Arcelor-Mittal. Las menas de hierro con mayor peso en los ensayos fueron:

- Magnetita.
- Siderita.
- Hematites.
- Limonita.

Algunas menas de otros minerales pero con contenido en Fe también fueron ensayadas como el caso de calcopirita [S.W. Kingman, K. Jackson, A. Cumbane, R. Greenwood, S.M. Bradshaw, N.A. Rowson, 2001]. Aunque los estudios no sólo se centraron en los minerales con contenido en hierro.

Respecto al coque, fue estudiado antes y después de la coquitización carbones de varias minas distribuidas por el mundo [B.K. Sahoo, B.C. Meikap, 2011].

## **f. Que propiedades han sido medidas:**

### **I. Propiedades dieléctricas:**

Existen pocos estudios que se centren exclusivamente en el conocimiento de las propiedades dieléctricas bajo frecuencias de microondas. Como se ha comentado previamente, normalmente,

son estudios que se apoyan paralelamente y como complemento a los ensayos bajo microondas. Además no hay mención sobre como se han calculado, es decir, no profundizan en los ensayos o técnicas utilizadas se limitan a describir las propiedades con fórmulas [*Hua-Min Li, Chang-Ho Ra, Gang Zhang and Won Jong Yoo, 2008*], simplemente son nombradas.

A continuación se enumeran las principales mediciones.

- Permitividad. (Constante eléctrica).
- Factor de pérdida dieléctrico.
- Permeabilidad<sup>4</sup>.
- Constante de relajación<sup>5</sup>.
- Frecuencias de trabajo.

De todos los puntos expuestos el factor de pérdida y la constante dieléctricas fueron las más documentadas ya que describe a la perfección las propiedades dieléctricas (calentamiento por microondas). Aunque existen estudios que profundizaron más en el comportamiento dieléctrico [*David E. Clark, Diane C.Folz, Jon A.West, 2000*], [*Michal Lovás, Ingrid Znamenáčková, Anton Zubrik, Milota Kováčová y Silvia Dolinská, 2011*] o el estudio “*Dielectric, electrical and infrared studies of g-Fe2O3 prepared by combustion metho*” entre otros estudios. Es importante comprender el tiempo de relajación y el momento polar, todos los estudios que acaban de ser nombrados lo explican.

## II. Calentamiento bajo microondas:

Todos los estudios están centrados en un aspecto, calentar el material para que este calentamiento favorezca los posteriores usos industriales.

Es importante fijar la exposición a la onda electromagnética, un tratamiento excesivo puede disparar los costes y dañar el material, en cambio, un tratamiento pobre puede llegar a no ser efectivo. Por eso, la mayoría de los estudios están centrados en los tiempos de exposición (cíclicos con intervalos de descanso o continuos). Se ha demostrado que es mejor un tratamiento cíclico y con descanso [*Cristina Leonalli, Timothy J. Mason, 2010*] o [*S.M. Javad Koleini y Kianoush Barani, 2005*].

Otro factor interesante de resaltar es el tipo de frecuencia con la que son irradiados los materiales. No es muy difícil imaginar que cuando menor sea la longitud de onda mayor será el aporte de energía de ésta al material, se demostró que para un calentamiento más rápido es

---

<sup>4</sup> Propiedad dieléctrica que depende del campo magnético de la onda electromagnética.

<sup>5</sup> Frecuencia de pérdida máxima.



mejor moverse en las bandas de energía más energéticas del microondas, concretamente en 0.915 GHz y 2.45 GHz [*Leonalli, Timothy J. Mason, 2010*]. Aunque en la mayoría de los experimentos la potencia se fija en 2.45 GHz.

El uso de estas frecuencias, tienen otra explicación: el aspecto experimental. La mayoría de los documentos utilizados como apoyo, están basados en experimentos de laboratorio con hornos microondas comerciales (2.45GHz). Es por eso que existe un vacío de resultados en otros rangos de frecuencias.

Otro factor documentando es la potencia utilizada. La potencia suministrada por la red siempre es superior a la potencia con la que trabaja un magnetrón. Fijar una potencia puede ser determinante a la hora de reducir el coste del proceso. Dentro de los estudios realizados, no hay gran variación en la potencia, normalmente oscilan entre los 500W y 1000W, siendo raro las potencias de trabajo inferiores.

Por último, también se estudió el tipo de calentamiento y como se produce. Lo que se busca es detectar que clase de material es, si presenta un calentamiento hiperactivo, activo o simplemente que no reacciona a la onda electromagnética. Centrando los valores en las tablas los resultados de temperatura máxima alcanza y el aumento de esta en ( $^{\circ}\text{C/s}$ ) como ya se había nombrado.

No solo se han centrado en el estudio de mineral de hierro [*Cristina Leonalli, Timothy J. Mason, 2010*] o coque. La mayoría de los experimentos ensayaban toda clase de minerales de uso industrial para tener una base de datos.

Paralelamente al calentamiento se han realizado otros estudios, unos en cada campo. El caso de Arcelor-Mittal está centrandose en demostrar la mejora en la molienda de los minerales. Siendo el coque más documentado que los minerales de hierro. Algunos estudios, concretamente el trabajo [*D.A. Jones, T.P. Lelyveld, S.D. Mavrofidis, S.W. Kingman \*,N.J. Miles, 2001*] se atrevió a predecir que el tratamiento podría ser óptimo entre 1000 y 30.000 T/día.

Un estudio reciente realizado en el INCAR demuestra que a partir de los 200gr de material el uso de microondas empieza a ser rentable (el trabajo está pendiente de ser publicado).

Resumiendo, las principales mediciones son:

- Calentamientos experimentados.
- Gradientes térmicos.
- Tiempos de exposición.
- Clase de exposición.

- Frecuencia de trabajo.
- Potencia de trabajo.
- Posible impacto económico.
- Derivadas del uso de microondas. Aplicaciones.

### **g. Como han sido medidas:**

Es importante diferenciar dos aspectos, la medición de las propiedades dieléctricas, mediciones de los calentamientos y la consecuencia de éstos.

#### **I. Propiedades dieléctricas:**

Siendo un apartado muy importante del trabajo se dedicará un apartado exclusivo a ello. Dicha explicación está apoyada en la documentación proporcionada por fabricantes.

#### **II. Calentamientos bajo microondas:**

- Bajo cámaras térmicas.
- Termómetros.
- Granulometría.
- Índice de bond.

### **h. Que interpretaciones se han hecho:**

- Se han asumido condiciones ideales. Es decir, el material dieléctrico absorbe toda la onda, no hay onda reflejada.
- Se considera que el calentamiento siempre es producido por el movimiento iónico y la rotación bipolar de las moléculas. Ignoran o desconocen otro tipo de calentamiento debido al microondas.
- El calentamiento es homogéneo, normalmente se distribuye la onda de forma homogénea por lo que la onda está perfectamente distribuida. Por tanto, las apariciones de hotpots<sup>6</sup> se asumen por las imperfecciones internas del material no por un mal suministro de la onda.

---

<sup>6</sup> Calentamiento no homogéneo del material.

- La información de las propiedades dieléctricas es variable; sobre todo la de los minerales de hierro, cambian en función de la procedencia de éste. El carbón es más predecible, depende básicamente del contenido en cenizas y el grado de humedad. Por eso las propiedades dieléctricas normalmente no son medidas. Se explican en función del calentamiento.
- Los minerales de hierro (a excepción del Hematites) y el carbón tienen un calentamiento hiperactivo a 2.45GHz de decenas de grados en pocos minutos.

## **i. Vacíos de información:**

### **I. Propiedades dieléctricas:**

- Vacío en el conocimiento de las propiedades dieléctricas de los elementos puros.
- Conocimiento en función de objetivo.
- Variabilidad de las propiedades.
  - Material: humedad, porosidad etc.
  - Ajenas al material: frecuencia y la temperatura son los principales variables que influyen en éstas.
- No existe un modelo que explique o demuestre como varían las propiedades de manera exacta en función de las variables.

### **II. Calentamiento por microondas:**

- Falta de conocimientos a frecuencias distintas de 2.45 GHz.
- Dimensionamiento de la caja de resonancia.
- Fenómeno de plasma y “hotpots”.

Sin protocolo de actuación. Además no existe conocimiento de las propiedades dieléctricas de los elementos puros en profundidad.

## **j. Conclusiones:**

La mayoría de los estudios se centran en las consecuencias de los calentamientos producidos por microondas, estudian la clase de calentamiento, gradientes térmicos y temperaturas alcanzadas bajo ciertos intervalos de tiempo. Hay una falta de información respecto a la influencia de las distintas frecuencias de trabajo. Se han estudiado fenómenos asociados al calentamiento como

los “hotpots” [*Effect of radiation losses on hotpot formation and propagation of microwave heating, C.García*] y a la aparición de plasma.

A su vez, estos calentamientos son la antesala del objetivo de muchos de muchos estudios, las posibles explicaciones van desde ensayos de molienda a activación de carbones. Los artículos más estudiados están relacionados con la molienda.

Respecto al cálculo de las propiedades dieléctricas no son calculadas, usan estas propiedades en una serie de fórmulas para deducir un cierto comportamiento dieléctrico, se necesita el estudio de los ensayos dieléctricos para calcular estos valores.

Por último, no hay estudios concluyentes que arrojen datos sobre el límite de producción y su implantación industrial.

### **3. PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS MATERIALES.**

#### **a. Concepto material dieléctrico.**

Definición:

Se denomina dieléctrico al material mal conductor de electricidad pero si es sometido a un campo eléctrico externo, puede establecerse en él un campo interno, a diferencia de los materiales aislantes con los que suelen confundirse.

Las microondas al incidir sobre el material provocan el movimiento molecular por la migración de las especies iónicas<sup>7</sup> o por la rotación de las especies dipolares<sup>8</sup> (generación del campo interno). Siendo este último concepto el más importante en el presente estudio porque es el principal responsable del calentamiento bajo frecuencias de microondas.

#### **b. Características dieléctricas de los materiales.**

Teniendo en cuenta la expuesto hasta ahora se puede hacer una clasificación de los materiales en función de su comportamiento frente a una onda electromagnética. Es la siguiente:

- Conductores: Materiales cuya superficie refleja las microondas, de modo que no se calientan. Es el caso de la mayoría de los metales.
- Aislantes/Transparentes: Materiales de baja pérdida dieléctrica. Materiales transparentes a las microondas; la penetración es total pero no se produce calentamiento alguno.
- Absorbentes: Materiales de alta pérdida dieléctrica. Materiales que absorben la energía de microondas y la convierten en calor fácilmente. Estos materiales son los denominados dieléctricos.
- Existe un cuarto comportamiento que es mezcla de los anteriores, es común en los materiales compuestos o bifásicos. Uno provocando gran parte de la gran pérdida mientras que el otro actúa con poca pérdida. Aunque también se presenta en la mayoría de los materiales porque nunca se produce un comportamiento perfectamente absorbente, transparente o conductor.

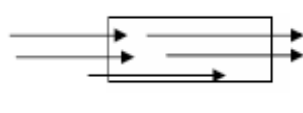
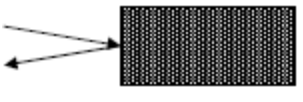
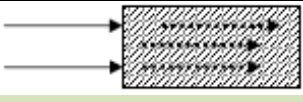
---

<sup>7</sup> Elementos con carga no neutra por defecto o exceso de electrones. Cationes elementos con carga positiva y aniones elementos con carga negativa.

<sup>8</sup> O solo polaridad es una propiedad de las moléculas que representa la separación de las cargas eléctricas en la misma.

En la siguiente tabla se muestra el movimiento de la onda respecto a la clasificación anterior a excepción del comportamiento mixto.

Tabla 1. Clasificación de los materiales según su naturaleza dieléctrica.

FIGURA	MATERIAL	PENETRACIÓN
	TRANSPARENTES (sin calentamiento)	TOTAL
	CONDUCTOR (sin calentamiento)	SIN
	ABSORVENTE (calentamiento)	PARCIAL

### c. Concepto onda electromagnética.

Se trata de campo electromagnético variable, es decir una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Son las cargas eléctricas las que generan el campo electromagnético al ser aceleradas.

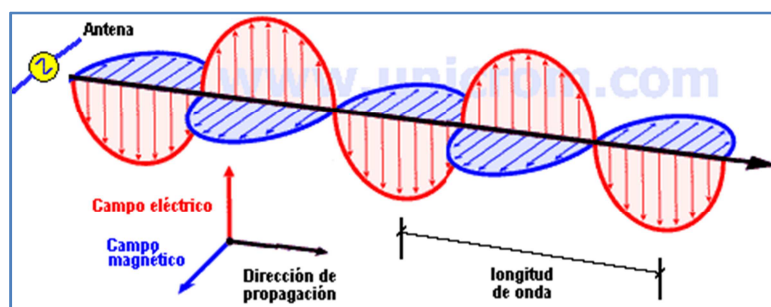


Ilustración 3. Esquema onda electromagnética.

Esta radiación se puede manifestar de diversas maneras, como calor radiado, luz visible, rayos X o rayos gamma.

#### I. Caracterización de las ondas:

Toda onda electromagnética actúa de forma distinta al pasar de un medio a otro, es en esta frontera y el movimiento de la onda dentro del material lo que definirá las propiedades

dielectricas del medio. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiacion electromagnetica se puede propagar en el vacio.

## II. Penetracion de la radiacion electromagnetica.

En funcion de la frecuencia, las ondas electromagneticas pueden no atravesar medios conductores. Sin embargo, como la energia no se crea ni se destruye, cuando una onda electromagnetica choca con un conductor pueden suceder dos cosas. La primera es que se transformen en calor: este efecto tiene aplicacion en los hornos de microondas. La segunda es que se reflejen en la superficie del conductor (como en un espejo).

## III. Refraccion.

La velocidad de propagacion de la radiacion electromagnetica en el vacio es (c). La teoria electromagnetica establece que:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1)$$

Siendo la ( $\epsilon_0$ ) permitividad electrica en el vacio y ( $\mu_0$ ) la permeabilidad magnetica del vacio respectivamente.

En un medio material la permitividad electrica tiene un valor diferente a la que hay en el vacio. Lo mismo ocurre con la permeabilidad magnetica, por tanto, la velocidad de propagacion de la onda por el medio (v) sera diferente a (c) y siempre sera inferior.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2)$$

Cuando la luz cambia de medio experimenta una desviacion que depende del angulo con que incide en la superficie que separa ambos medios. Se habla, entonces, de angulo incidente y angulo de transmision.

(El concepto de permitividad y permeabilidad seran estudiados mas adelante)

## IV. Dispersion.

La permitividad electrica y la permeabilidad magnetica de un medio diferente del vacio dependen, ademas de la naturaleza del medio, de la longitud de onda de la radiacion. De esto se desprende que la velocidad de propagacion de la radiacion electromagnetica en un medio

depende también de la longitud de onda de dicha radiación. Por tanto, la desviación de un rayo de luz al cambiar de medio será diferente para cada longitud de onda.

### V. Propagación de la onda.

Como se ha comentado al principio del capítulo, no toda la onda es capaz de penetrar en el material, hay pérdidas debido al cambio de resistencia eléctrica entre el medio y el vacío. Tanto la permeabilidad y la permitividad son responsables de este comportamiento.

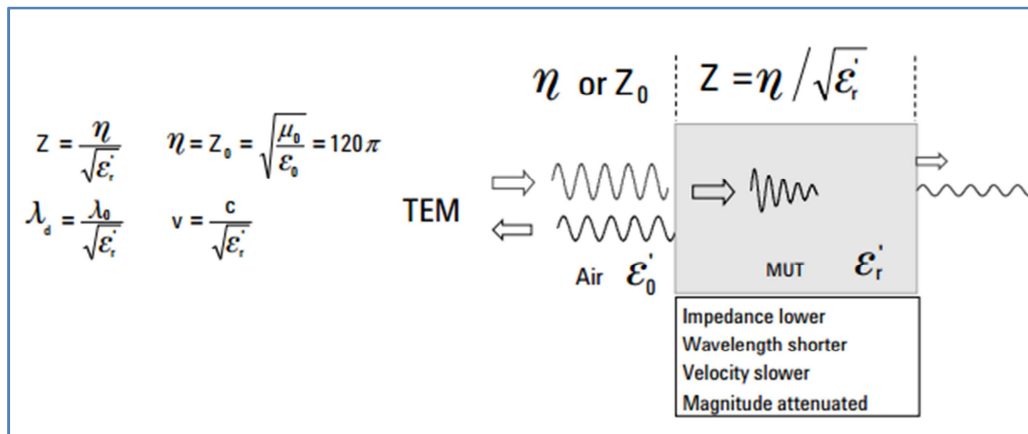


Ilustración 4. Clases de comportamiento onda-material.

La resistencia en la muestra (MUT) es menor que la existida en el aire/vacío. De la imagen también se observa que no sólo parte de la onda es reflejada, otro porcentaje no es absorbido por el material viajando a través de él y emitiendo desde la cara opuesta irradiada. En la imagen se observan los 3 comportamientos dieléctricos. Además la velocidad de propagación por el medio está condicionada por la permitividad y la resistencia por la permeabilidad y permitividad

$$Z = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon'}} \quad \eta = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \quad (3)$$

### VI. Espectro electromagnético:

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia.

En la siguiente imagen se muestra los distintos espectros electromagnéticos en función de:



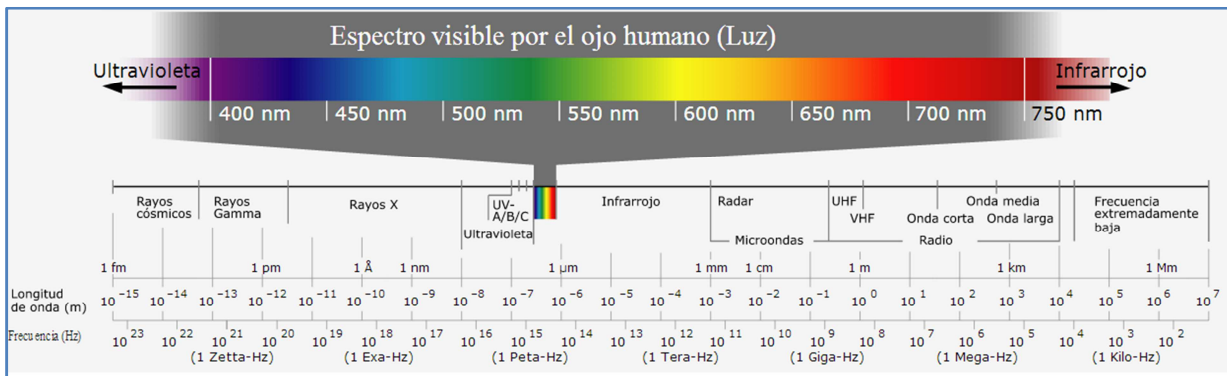


Ilustración 5. Espectro electromagnético

- Penetración atmosférica.
- Frecuencia.
- Longitud de onda.
- Temperatura de los objetos emisores.

#### d. Propiedades dieléctricas.

1. Permitividad.
2. Permeabilidad.
3. Susceptibilidad.
4. Rigidez dieléctrica

La interacción entre un campo eléctrico con materia condensada es comúnmente conocida como respuesta dieléctrica. Una descripción macroscópica de este comportamiento la dan las siguientes propiedades:

- El tipo de onda.
- Frecuencia de onda.
- Orientación y distribución de la onda.
- Temperatura del cuerpo sometido a la onda.
- Estructura molecular del objeto sometido a la onda.
- Contenido en agua.
- Presión.
- Mezcla.
- Porosidad.

Esto indica que las propiedades dieléctricas de un mismo material fluctúan según las condiciones en que sean medidas. Es recomendable fijar estos condicionantes.

Según la teoría dieléctrica sus principales propiedades son: la permitividad (pérdidas eléctricas del campo), permeabilidad (pérdidas magnéticas) y resistividad o rigidez dieléctrica. Hay otras características como la conductancia que tienen menor peso en el presente trabajo.

Esa capacidad de almacenamiento de energía está relacionada con la constante dieléctrica ( $k$  o  $\epsilon$ ) medida en F/m y es la principal de las propiedades dieléctricas a la hora de definir un material. Otra de las variables dieléctricas es la permeabilidad ( $\mu$ ), media en que describe la interacción de la materia con un campo magnético, es decir, la capacidad del medio para atraer o hacer/dejar pasar un campo magnético por él. Por último, está la rigidez dieléctrica, que es el valor límite de intensidad de campo eléctrico por el cual el material pasa de ser aislante a conductor. Su unidad de medida es el V/m.

El conocimiento de las propiedades dieléctricas del material es fundamental para el diseño adecuado de aplicaciones con microondas. La medición de las propiedades dieléctricas no es una tarea fácil y requiere de técnicas especializadas (serán explicadas más adelante).

A continuación se explicará más en detalle las propiedades:

#### I. Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ):

La permitividad es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Se puede considerar una medida relativa de la densidad de microondas.

Esta permitividad determina la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico. Está directamente relacionada con la susceptibilidad eléctrica, que es constante de proporcionalidad que relaciona el campo eléctrico aplicado ( $H$ ) con la polarización eléctrica inducida ( $M$ ).

Desde el punto de vista de la teoría electromagnética, la definición de eléctrica desplazamiento (densidad de flujo eléctrico)  $D_f$  es:

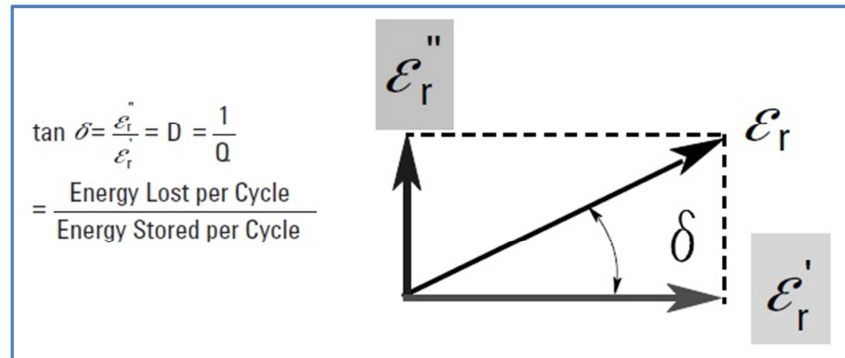
$$D_f = \epsilon * E.$$

$$\text{Donde } \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

Siendo ( $\epsilon$ ) la permitividad absoluta, ( $\epsilon_r$ ) la permitividad relativa (constante dieléctrica), ( $\epsilon_0$ ) la permitividad en el vacío, de valor:  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$  F/m

Las componentes de la permitividad muestran dos condiciones del material, la parte real ( $\epsilon'$ ) energía almacenada y la parte imaginaria ( $\epsilon''$ ) que mide la eficacia en que la energía electromagnética ha sido almacenada. Ésta suele ser mayor que 0 y de menor valor que la parte real.

En la siguiente imagen se muestra las dos componentes en un diagrama vectorial ortogonal.



**Ilustración 6. Representación ortogonal de la permitividad.**

Siendo (D) el factor de disipación y (Q) el factor de calidad, el factor de pérdida.

Con la combinación lineal de ambas componentes se obtiene la tangente  $\delta$  ( $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$ ).

Estos valores son los más importantes a la hora de definir si un material es dieléctrico o no lo es siendo ( $\delta$ ) el valor de calidad que tiene un material.

Esta tangente de pérdida se puede expresar en mili-radianes o micro-radianes.

## II. Permeabilidad dieléctrica ( $\mu$ ):

Como se había dicho, la permeabilidad describe la interacción de un material con un campo magnético.

Al igual que la permitividad tiene dos componentes, uno real y otro imaginario. La compoene de un real ( $\mu'$ ) representa el almacenamiento de energía y la parte imaginaria ( $\mu''$ ) representa la pérdida de energía.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

Aunque suele ser representada con la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (5)$$

Siendo (B) la densidad del flujo magnético y (H) la intensidad de campo.

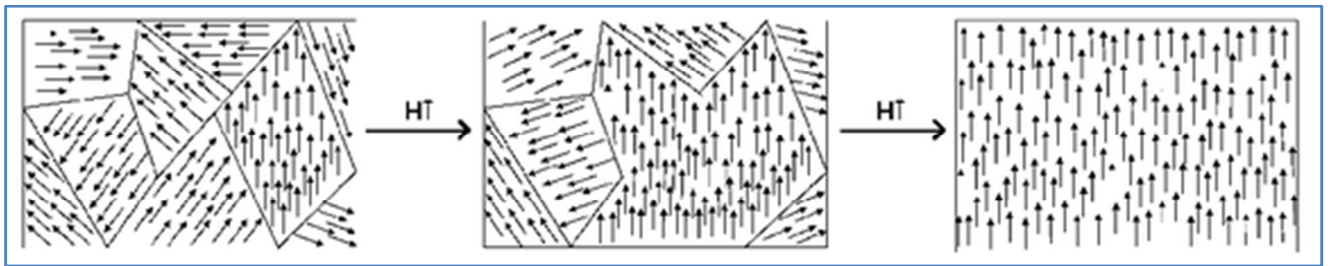
Esta variable dieléctrica está muy relacionada con la naturaleza magnética de los materiales, divididos en tres grandes grupos, son los siguientes:

**Paramagnéticos:** Los materiales paramagnéticos son la mayoría de los que encontramos en la naturaleza. No presentan ferromagnetismo, y su reacción frente a los campos magnéticos es muy poco apreciable. Este paramagnetismo es la tendencia de los momentos magnéticos libres (espines u orbitales) a alinearse paralelamente a un campo magnético. Si estos momentos magnéticos están fuertemente acoplados entre sí, el fenómeno será ferromagnético. Cuando no existe ningún campo magnético externo, estos momentos magnéticos están orientados al azar. En presencia de un campo magnético externo tienden a alinearse paralelamente al campo, pero esta alineación está contrarrestada por la tendencia que tienen los momentos a orientarse aleatoriamente debido al movimiento térmico.

Este alineamiento de los dipolos magnéticos atómicos con un campo externo tiende a fortalecerlo. Esto se describe por una permeabilidad magnética superior a la unidad, o, lo que es lo mismo, una susceptibilidad magnética positiva y muy pequeña.

**Ferromagnéticos:** los materiales ferromagnéticos son aquellos que atraen el campo hacia su interior. Este ferromagnetismo es un fenómeno físico en el que se produce el ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido. La interacción ferromagnética es la interacción magnética que hace que los momentos magnéticos tiendan a disponerse en la misma dirección y sentido y ha de extenderse por todo un sólido para alcanzar el ferromagnetismo. Los materiales están divididos en dominios magnéticos, separados por superficies conocidas como paredes de “Bloch”. En cada uno de estos dominios, todos los momentos magnéticos están alineados. En las fronteras entre dominios hay cierta energía potencial, pero la formación de dominios está compensada por la ganancia en entropía.

Al someter un material ferromagnético a un campo magnético intenso, los dominios tienden a alinearse con éste, de forma que aquellos dominios en los que los dipolos están orientados con el mismo sentido y dirección que el campo magnético inductor aumentan su tamaño. Este aumento de tamaño se explica por las características de las paredes de “Bloch”, que avanzan en dirección a los dominios cuya dirección de los dipolos no coincide; dando lugar a un monodominio. Al eliminar el campo, el dominio permanece durante cierto tiempo.



**Ilustración 7. Orientación de los dominios magnéticos al someter el material a un campo magnético.**

Es importante tener en cuenta, que a cierta temperatura los materiales magnéticos pierden su carácter magnético para comportarse como un paramagnético. En el caso del Fe la temperatura es 1043 K. reduciéndose en sus óxidos.

Diamagnetismo: En electromagnetismo, el diamagnetismo es una propiedad de los materiales que consiste en repeler los campos magnéticos. Es lo opuesto a los materiales ferromagnéticos los cuales son atraídos por los campos magnéticos

Resumiendo los materiales se pueden clasificar según su permeabilidad magnética relativa en:

- ferromagnéticos, cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1.
- paramagnéticos o no magnéticos, cuya permeabilidad relativa es aproximadamente 1 (se comportan como el vacío).
- diamagnéticos, de permeabilidad magnética relativa inferior a 1.

Siendo esta permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ):

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

( $\mu_0$ ), permeabilidad en el vacío y ( $\mu$ ) permeabilidad absoluta

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

Existe una relación entre la permeabilidad y el campo aplicado, que influye en el grado de magnetización del material, la susceptibilidad magnética.

$$M = X \times H \tag{6}$$

Siendo (H) el campo y (M) la intensidad del momento magnético. El parámetro (X) determina la naturaleza del material. La relación entre la susceptibilidad y la permeabilidad la define la siguiente fórmula:

$$\mu = \mu_0(X + 1) \quad (7)$$

- Si  $X > 0$ . El material es paramagnético.
- Si  $X < 0$ . El material es diamagnético.
- Si  $X \gg 1$ . El material es ferromagnético.

Es importante mencionar que algunos materiales, tales como hierro, cobalto, níquel, y sus respectivas aleaciones tienen propiedades magnéticas apreciables; Sin embargo, la mayoría de los materiales son no magnético, haciendo que su permeabilidad esté muy cerca de la permeabilidad del vacío ( $\mu_r = 1$ ).

Por otro lado, todos los materiales tienen propiedades dieléctricas, por lo que el enfoque de esta discusión será sobre todo en medidas de permitividad.

### III. Relación constantes dieléctricas calentamiento.

Como se había comentado anteriormente, la constante dieléctrica es la capacidad que tiene el material para retardar la energía de microondas a medida que pasa a través; el factor de pérdida es una medida de la capacidad del material para disipar la energía. En otras palabras, el factor de pérdida representa la cantidad de energía de microondas que se pierde en el material al ser disipada en forma de calor. Por lo tanto, un material con un alto factor de pérdida se calienta fácilmente por la energía de microondas. Esta componente imaginaria de la permitividad es proporcional al tamaño de permitividad dieléctrica y la pérdida puede ser utilizada como un criterio para evaluar la idoneidad de calefacción en el horno de microondas. Esto será explicado más adelante más en detalle.

Hay que tener en cuenta que la temperatura afecta a las propiedades dieléctricas del material, es decir, al aumentar la temperatura puede variar las componentes ( $\epsilon'$ ) y ( $\epsilon''$ ).

Otra característica importante de calentamiento por microondas es el fenómeno de la formación del “punto de acceso”, donde aparecen regiones de muy alta temperatura debido al calentamiento no uniforme.

La mayoría de esa energía es transformada en calor como muestra la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon''|E^2|}{\rho C p} \quad (8)$$

Las microondas son absorbidas por el componente que tiene una alta pérdida dieléctrica al pasar a través del material de baja pérdida.

Las propiedades dieléctricas también son muy importantes para determinar el calentamiento del material. Son consecuencia directa del tipo de penetración y la profundidad de ésta.

La penetración de la onda viene dada por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{3\lambda_0}{8.686 \pi \tan\delta \sqrt{\left(\frac{\epsilon' r}{\epsilon_0}\right)}} \quad (9)$$

Es importante conocer esta penetración para saber el tipo de calentamiento y si será uniforme o no.

Una frecuencia alta y grandes valores de propiedades dieléctricas producirán un calentamiento superficial, sin embargo, un calentamiento más volumétrico aparecerá con frecuencias menores y propiedades dieléctricas bajas.

Cuando las microondas penetran en estos materiales las ondas se propagan a través de él, se genera un campo eléctrico interno dentro de un volumen específico. Las microondas inducen los movimientos transitorios de cargas libres o unidas (por ejemplo, electrones o iones) y asimismo, inducen momentos en las cargas tales como dipolos. La resistencia a los estos movimientos inducidos causa pérdidas y atenúa el campo eléctrico debido a fuerzas inerciales, elásticas, y de fricción. Como resultado de estas pérdidas se produce el calentamiento volumétrico antes mencionado.

#### IV. Rigidez dieléctrica:

Entendemos por rigidez dieléctrica o rigidez electrostática el valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor. Se mide en voltios por metro V/m (en el SI).

También podemos definirla como la máxima tensión que puede soportar un aislante sin perforarse. A esta tensión se la denomina tensión de rotura de un dieléctrico.

### e. Mecanismos de pérdida.

Es importante tener en cuenta el siguiente apartado ya que estas pérdidas dieléctricas son las responsables del calentamiento experimentado por los materiales dieléctricos irradiados con microondas.

### PÉRDIDAS DEBIDAS A LAS OSCILACIONES DEL CAMPO.

#### I. Pérdidas según la naturaleza del material.

Hay que tratar los materiales en 2 grandes grupos, materiales con propiedades magnéticas y materiales no magnéticos.

Las dos principales causas de pérdidas en materiales no magnéticos se dividen en una pérdida dieléctrica (dipolar) y las pérdidas de conducción. Las pérdidas por conducción predominan en materiales metálicos, respecto a materiales aislantes dieléctricos dominan las pérdidas de alta conductividad y dipolares.

Los materiales magnéticos (como el caso de la magnetita) también exhiben pérdidas de conducción con pérdidas adicionales magnéticas como la histéresis, resonancia de la pared de dominio y de electrones espín nuclear (FMR).

#### II. Las pérdidas debidas a la oscilación del campo eléctrico

En materiales dieléctricos la absorción (grado de interacción) de microondas está relacionada con permitividad compleja del material, expresada de la siguiente forma:

$$\epsilon = \epsilon_0 + (\epsilon' + j\epsilon'') \quad (10)$$

Siendo ( $\epsilon_0$ ) la permitividad en el vacío de valor  $8.86 \times 10^{-12}$  F/m. La parte real e imaginaria como se había comentado anteriormente determina la constante dieléctrica relativa y la imaginaria el factor de pérdida dieléctrica relativa.

Cuando aplicamos una onda electromagnética (microondas) y ésta se propaga a través de un material dieléctrico el campo interno generado dentro del volumen afectado induce movimientos traslacionales de las cargas libres, electrones, iones o dipolos. Las fuerzas de inercia, elásticas y de fricción resisten éstos movimientos inducidos provocan las pérdidas dieléctricas, una consecuencia por las cuales aparece el calentamiento volumétrico [Sutton, 1989]. Estos mecanismos de pérdida se combinan entre sí para dar el parámetro ( $\epsilon''$ ) de pérdida dieléctrica. La siguiente figura ilustra la variación en ( $\epsilon'$ ) y ( $\epsilon''$ ) de un dieléctrico mostrando la relajación “Debye”.



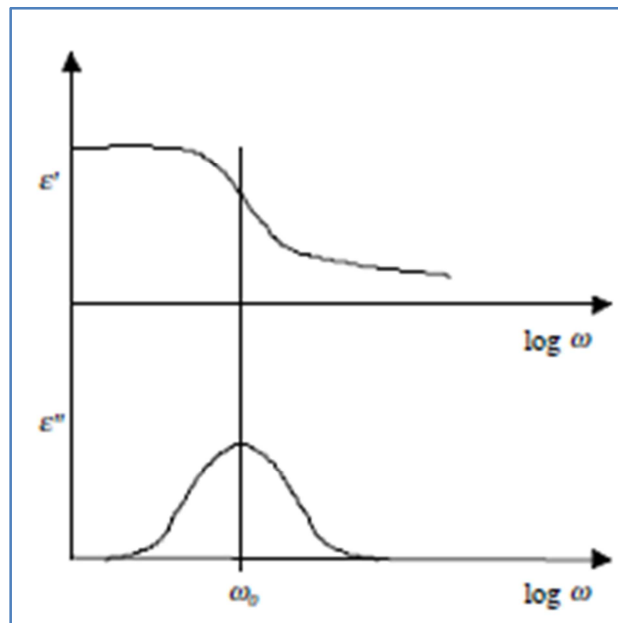


Ilustración 8. Relación permitividad-w

Teoría Debye-Hückle/Tiempo de relajación.

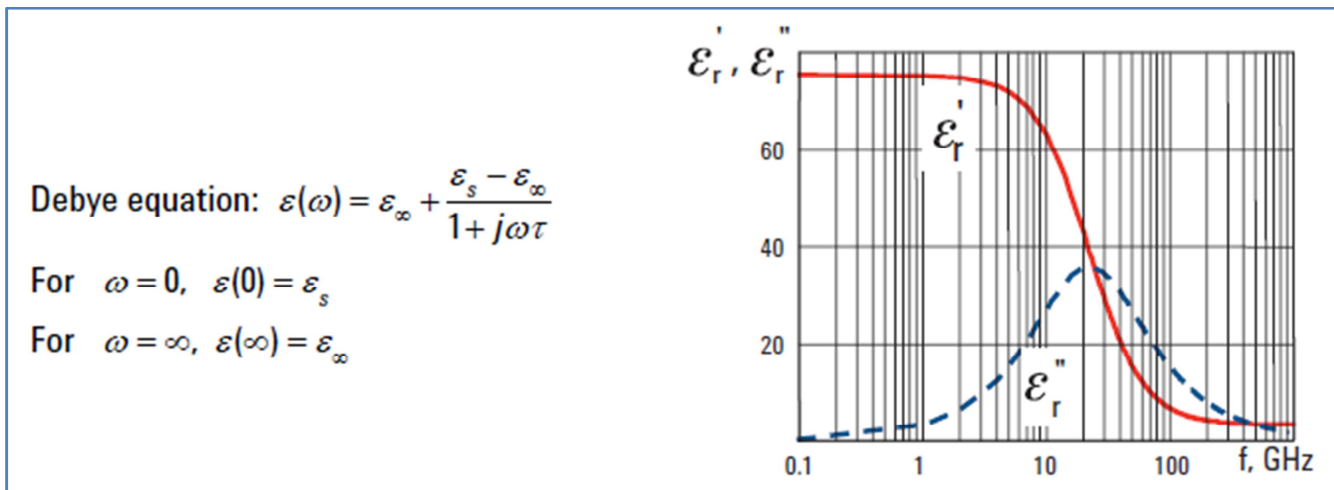
El tiempo de relajación ( $\tau$ ) es una medida de la movilidad de las moléculas (dipolos) o iones que existen en un material o el tiempo requerido para que los dipolos puedan orientarse en función del campo aplicado.

Los materiales líquidos y sólidos tienen moléculas que se encuentran en un estado condensado con una libertad limitada de movimiento al aplicarles un campo. Cuando se aplica un campo empiezan a aparecer una serie de colisiones constantes al intentar orientarse con el campo aplicado provocando la fricción interna con el tiempo de relajación constante ( $\tau$ ). Cuando el campo se desconecta, la secuencia se invierte y distribución aleatoria de los dipolos vuelve a aparecer manteniendo constante el tiempo de relajación otra vez. La ( $f_c$ ) frecuencia de relajación es inversamente al tiempo de relajación:

$$\tau = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f c} \tag{ 11}$$

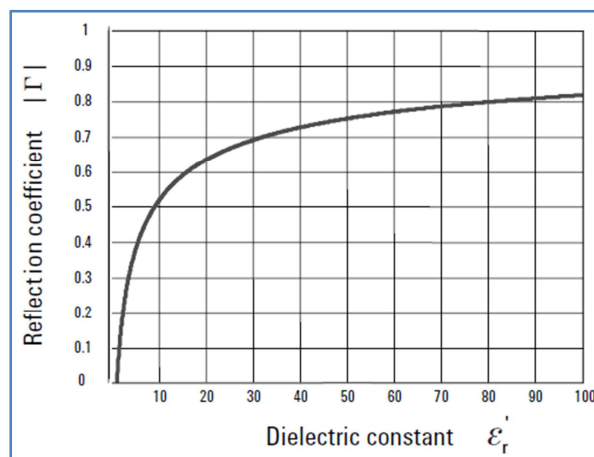
Ha frecuencias por debajo de este tiempo de relajación el campo aplicado es suficientemente poco energético que los dipolos son capaces de seguirle el ritmo de resonancia.

Al “trabajar” el material bajo éstas frecuencias la polarización del material puede alcanzar el 100% teórico. El factor de pérdida ( $\epsilon''$ ) es directamente proporcional a la frecuencia, es decir, a mayor frecuencia mayor pérdidas dieléctricas y finalmente un mayor gradiente térmico. Tal como se explica en la siguiente figura tomando como ejemplo agua a 30 °C.



**Ilustración 9. Frecuencia de relajación.**

En la siguiente imagen se muestra una comparativa entre el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ) y la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) de agua a 30 °C.



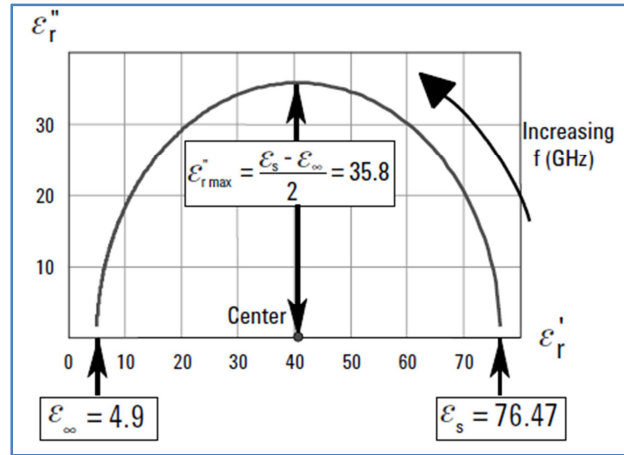
**Ilustración 10. Relación constante dieléctrica- reflexión.**

En la gráfica se representa la relación entre la constante dieléctrica de un material ensayado y el coeficiente de reflexión ( $\Gamma$ ) por un tiempo infinitamente largo y sin reflexión.

Para valores pequeños de la constante dieléctrica (aproximadamente menos de 20), hay un comportamiento exponencial del coeficiente de reflexión en función de la constante dieléctrica. Esto quiere decir, que este rango la medición de la constante dieléctrica utilizando el coeficiente de reflexión será más sensible y por lo tanto precisa. A la inversa, para altos valores de la constante dieléctrica (por ejemplo, entre 70 y 90) habrá poca cambio del coeficiente de reflexión y la medición tendrá más incertidumbre.

Diagrama Cole-Cole.

La permitividad compleja también se puede mostrar en un diagrama de Cole-Cole trazando la parte imaginaria ( $\epsilon_r''$ ) en el eje vertical y la parte real ( $\epsilon_r'$ ) en el eje horizontal con la frecuencia como parámetro independiente. En la siguiente imagen se representa.



**Ilustración 11. Diagrama Cole-Cole.**

Un diagrama de Cole-Cole es, en cierta medida, es similar al gráfico de Smith. Un material con una única frecuencia de relajación según lo exhibido por el relación Debye aparecerá como un semicírculo con su centro tirado en el eje horizontal= 0 el eje y el pico del factor de pérdida que ocurren en  $1 / \tau$ .

El material con múltiples frecuencias de relajación será un semicírculo o un arco (distribución no simétrica), con su centro de por debajo de la horizontal.

La curva de la figura es un medio círculo con su centro en el eje x y un radio. El valor máximo de la constante dieléctrica será igual al radio. La frecuencia se mueve en sentido antihorario en la curva.

## f. Concepto de microondas:

Durante todo el trabajo se ha hablado de las microondas, por lo que es conveniente definir que clase de onda es.

El microondas es una radiación electromagnética no ionizable asociada al espectro no visible de la luz con una longitud de onda entre 1m y 1mm, una frecuencia entre 300 GHz y 300MHz y periodo de oscilación entre  $3 \times 10^{-9}$  s y  $3 \times 10^{-12}$  s. La energía de microondas incluye 3 bandas que la dividen en 3 subgrupos: frecuencia ultra alta (UHF) desde los 300 MHz a 3GHZ,

frecuencia super alta (SHF) desde los 3GHz a 30GHz y la extremadamente alta (EHF) desde los 30 GHz a 300 GHz [Haque, 1999].

La energía de microondas se deriva de la energía eléctrica con una eficiencia de conversión de aproximadamente 50 % para 2450 MHz y 85 % para 915 MHz. Las microondas tienen longitudes de onda más largas y de menor energía que otras formas de energía electromagnética, como visible, luz ultravioleta o infrarroja [Metaxas y Meredith, 1983].

Existen multitud de fenómenos físicos asociados con la radiación electromagnética (emisión de calor, comunicaciones etc.). Todos estos fenómenos consisten en la emisión de radiación electromagnética en diferentes rangos de frecuencias o diferentes longitudes de onda. Es importante tener en cuenta que cualquier objeto conductor con una corriente alterna inducida, la radiación electromagnética se propaga en la misma frecuencia que la corriente. De forma similar, cuando una radiación electromagnética incide en un conductor eléctrico, hace que los electrones de su superficie oscilen, generándose de esta forma una corriente alterna cuya frecuencia es la misma que la de la radiación incidente.

El microondas se encuentra por encima de las ondas de radio y por debajo del infrarrojo. En la siguiente imagen se muestra la posición que ocupa el microondas en el espectro de luz y una tabla comparativa respecto al resto de ondas electromagnéticas en función de longitud de onda, frecuencias y energía.

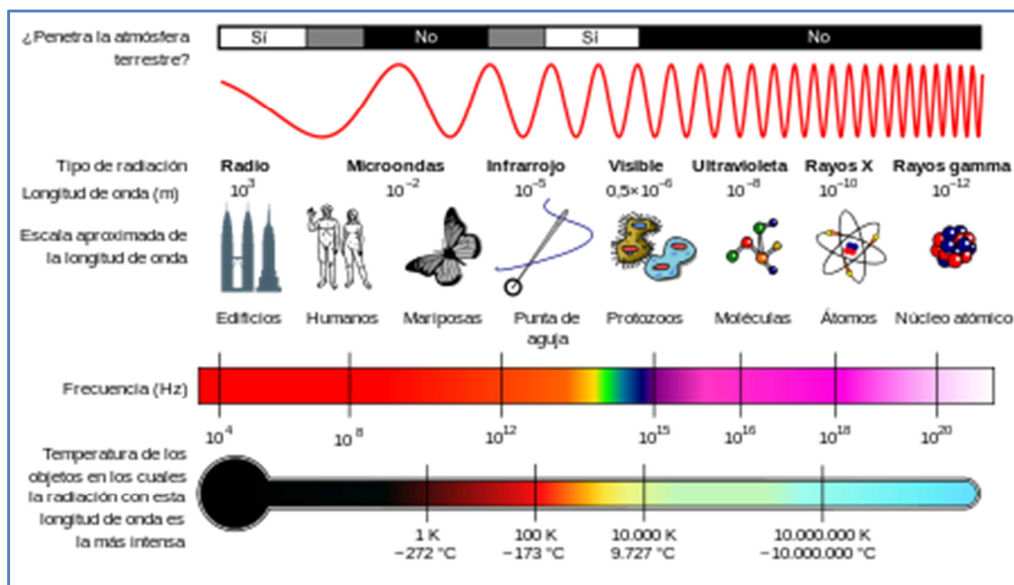


Ilustración 12. Comparativa entre ondas electromagnéticas.

En la siguiente tabla se hace una comparativa entre los tipos de radiación en función de su longitud de onda, frecuencia y energía.

Tabla 2. Tabla de las distintas clases de ondas electromagnéticas.

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12} \text{ m}$	$> 30,0 \times 10^{18} \text{ Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 30,0 \times 10^{15} \text{ Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
Ultravioleta extremo	$< 200 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 1,5 \times 10^{15} \text{ Hz}$	$> 993 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Ultravioleta cercano	$< 380 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 7,89 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$> 523 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Luz Visible	$< 780 \times 10^{-9} \text{ m}$	$> 384 \times 10^{12} \text{ Hz}$	$> 255 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo cercano	$< 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$	$> 120 \times 10^{12} \text{ Hz}$	$> 79 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo medio	$< 50 \times 10^{-6} \text{ m}$	$> 6,00 \times 10^{12} \text{ Hz}$	$> 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo lejano	$< 1 \times 10^{-3} \text{ m}$	$> 300 \times 10^9 \text{ Hz}$	$> 200 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Microondas	$< 10^{-2} \text{ m}$	$> 3 \times 10^8 \text{ Hz}$	$> 2 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Ultra Alta Frecuencia – Radio	$< 1 \text{ m}$	$> 300 \times 10^6 \text{ Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-26} \text{ J}$
Muy Alta Frecuencia – Radio	$< 10 \text{ m}$	$> 30 \times 10^6 \text{ Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
Onda Corta – Radio	$< 180 \text{ m}$	$> 1,7 \times 10^6 \text{ Hz}$	$> 11,22 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
Onda Media – Radio	$< 650 \text{ m}$	$> 650 \times 10^3 \text{ Hz}$	$> 42,9 \cdot 10^{-29} \text{ J}$
Onda Larga – Radio	$< 10 \times 10^3 \text{ m}$	$> 30 \times 10^3 \text{ Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$

Existe una subdivisión dentro del propio espectro, que tendrán importancia en el tratamiento con microondas ya que no todas las frecuencias no son adecuadas.

A continuación se muestra la tabla europea:

Tabla 3. Rango de frecuencia de los microondas.

Banda	Rango de frecuencia
Banda A	hasta 0.25 GHz
Banda B	0.25 GHz a 0.50 GHz
Banda C	0.50 GHz a 1 GHz
Banda D	1 GHz a 2 GHz
Banda E	2 GHz a 3 GHz
Banda F	3 GHz a 4 GHz
Banda G	4 GHz a 6 GHz
Banda H	6 GHz a 8 GHz
Banda I	8 GHz a 10 GHz
Banda J	10 GHz a 20 GHz
Banda K	20 GHz a 40 GHz
Banda L	40 GHz a 60 GHz

Siendo la mejor frecuencia según el artículo [*“Microwave and ultrasonic processing: Now a realistic option for industry”* de Cristina Leonelli y Timothy J. Mason, publicado por la revista *“Chemical Engineering and Processing: Process Intensification”* el 5 de febrero de 2010] la comprendida entre 0.915 and 2.45 GHz. Es decir entre la bandas C y E del modelo europeo y la SHF en el modelo americano. Hay pocos estudios con diferentes frecuencias debido al uso de microondas de uso comercial para los experimentos, hay pocos datos en frecuencias superiores

La mayoría de los materiales se calienta bajo un orden de frecuencias en condiciones exotérmicas (transformando energía electromagnética en calor).

## 4. MEDIDAS PROPIEDADES DIELECTRICAS.

Existen muchos términos diferentes que se usan actualmente para describir las propiedades electromagnéticas de los materiales. A su vez, y casi proporcionalmente, existe mucha confusión sobre el significado de éstos y cómo se relacionan entre sí. Así, en las siguientes diapositivas, se intentará clarificar los principales constantes, por eso, y antes de empezar a desarrollar las distintas técnicas y fabricantes, se hará un pequeño resumen de lo documentado hasta hora para ayudar a fijar los principales puntos de interés.

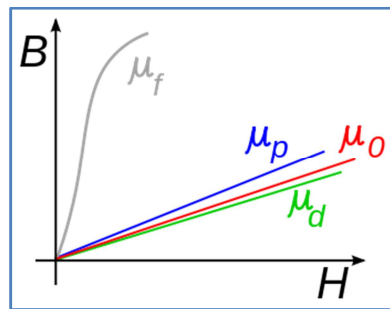
### a. **Definiciones:**

- Dieléctrico: material no conductor de electricidad, pero que al incidir un campo en él el material reacciona generando un campo interno en él. Es decir, todos los materiales son potencialmente dieléctricos.
- Permitividad ( $\epsilon$ ): o también conocida como constante dieléctrica y a veces nombrada por la letra griega kappa ( $k$ ). La permitividad es una magnitud física que describe cómo el campo eléctrico afecta y se ve afectado por un medio dieléctrico y determinar la capacidad de polarización de un material al ser radiado. Por tanto la permitividad es la capacidad que tiene un material para transmitir un campo eléctrico o describe la interacción onda electromagnética materia. ( $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica).

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_t = \epsilon' r - j\epsilon'' r \quad (12)$$

- Permeabilidad ( $\mu$ ): capacidad del material para atraer y hacer pasar a través de él campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material. Al igual que la permitividad es un complejo.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \mu = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (13)$$



**Ilustración 13.** Comparación simple de permeabilidades para: ferromagnéticos ( $\mu_f$ ), paramagnéticos ( $\mu_p$ ), diamagnéticos ( $\mu_d$ ) y el vacío ( $\mu_0$ ).

Tanto permitividad como la permeabilidad son complejos, pero no es constante (otra razón por la constante dieléctrica es ambigua). Es importante volver a recordar esto y tenerlo muy en cuenta cuando se calculen las constantes dieléctricas. Existen muchos factores que influyen en estos cambios en las mediciones siendo la temperatura y la frecuencia los más importantes, son los siguientes:

- Temperatura de la materia.
- Frecuencia de la onda electromagnética radiada.
- Naturaleza del material. Magnético o no magnético.
- Volumen y área superficial.
- Porosidad.
- Contenido en agua.
- Impurezas, materiales compuestos o bifásicos.

Factor de pérdida ( $\tan\delta$ ): otro término que se verá a menudo en hojas de cálculo es la tangente de pérdida, también se llama tangente delta.

Es una medida que compara la energía perdida en relación con la energía almacenada.

$$\tan\delta = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{Energía perdida por ciclo.}}{\text{Energía almacenada por ciclo.}} \quad (14)$$

El término (D) o (Df) también se usa comúnmente para referirse al factor de disipación. No es de extrañar que la gente se confunda, todos estos términos significan lo mismo, la tangente de pérdida, tangente delta, factor de dispersión, y Df.

Constante de relajación ( $\tau$ ): es interesante conocer esta constante para muchas aplicaciones que involucran a materiales líquidos y polares. Para calentamiento por microondas, tasa de absorción específica, procesos químicos, es imprescindible conocer el tiempo de relajación ( $\tau$ ).



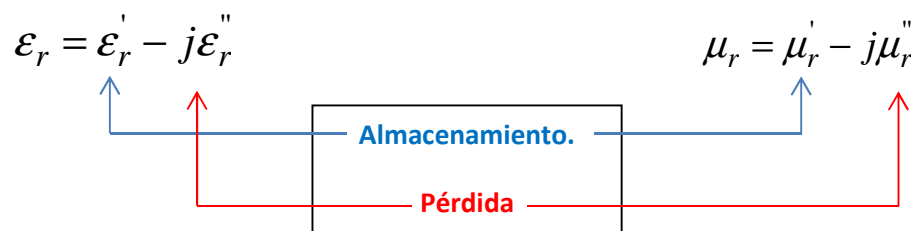
Para materiales dieléctricos dipolares, ( $\tau$ ) describe el tiempo requerido por los dipolos de pasar de un estado desordenado a alinearse con el campo eléctrico.

$$\tau = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f} \quad (15)$$

## b. Funcionamiento dieléctrico:

Cuando los campos eléctricos y magnéticos pasan a través de un material, cada uno puede interactuar con dicho material de dos formas:

1. Primera, almacenamiento: La energía puede ser intercambiada entre el campo y el material, de manera bi-direccional (sin pérdida). Este almacenamiento de energía está representada por la parte real de la permitividad o permeabilidad.
2. Segunda, pérdida: la energía del campo aplicado desde el exterior se puede “perder” y es absorbida por el material (generalmente en forma de calor). Esta pérdida de energía está representada por la parte imaginaria de la permitividad y la permeabilidad.



3. Tercero, máxima pérdida: está relacionado con el tiempo de relajación que necesita el material y la pérdida de energía que se producen los dipolos. Tiene la siguiente explicación:

- A bajas frecuencias (como las presentes en microondas), la rotación dipolar puede seguir fácilmente el campo aplicado; ( $\epsilon'$ ) será alto y el ( $\epsilon''$ ) será bajo.
- A medida que aumenta la frecuencia, el factor de pérdida, ( $\epsilon''$ ) incrementa a medida que los dipolos giran más y más rápido. Respecto al factor ( $\epsilon''$ ) los picos de pérdida en la frecuencia de  $1/\tau$  es el punto donde los dipolos están girando al su límite, y la energía transferida al material y la energía perdida es la máxima.
- A medida que la frecuencia aumenta, los dipolos no pueden seguir al campo y es cuando ( $\epsilon'$ ) y ( $\epsilon''$ ) caen. Nunca interesa superar este punto

A continuación se muestra una imagen con explicando lo expuesto anteriormente y mostrando el punto de máxima pérdida.

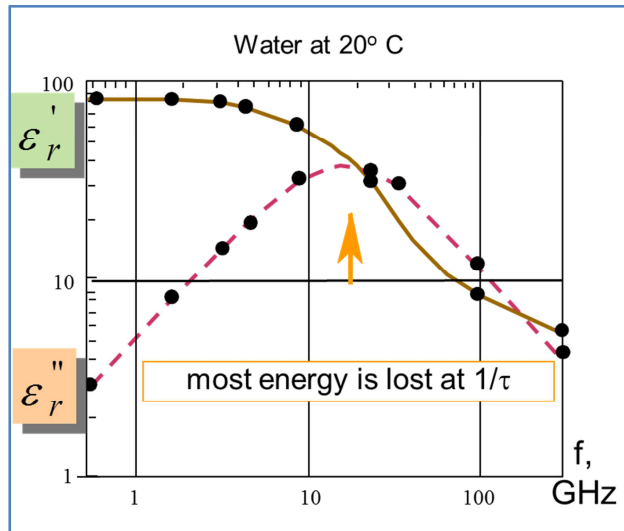


Ilustración 14. Pérdida máxima.

### c. Principales fabricantes:

En el siguiente apartado se hará mención de los principales fabricantes y se mostrarán los distintos dispositivos de medición y métodos necesarios para calcular las propiedades dieléctricas de los materiales al ser radiados por microondas. Se intentará ayudar a elegir cuál de los métodos expuestos serán el mejor las propiedades en función de las frecuencias de trabajo.

#### Lista de fabricantes:

- Agilent Technologies.
- BK Precision.
- PCE Instruments
- MCM-Electronics.
- IET Labs.
- Amprobe.
- Hioki.
- Chroma.
- Extech Instruments.
- GW Instech.
- Tegam.

- NF Corporation.
- Wayne Kerr Electronics.

#### **d. Sistemas de medida:**

Es el hardware del equipo de medida, hay varias clases y según el rango de frecuencias y el tipo de ensayo se utilizará uno u otro, siendo el analizador vectorial de redes y el medidor LCR los más utilizados.

##### Sistemas de medida:

- a. Network Analyzers (frecuencias altas).
- b. Lectores LCR y analizadores de impedancia (óptimos para microondas).
- c. Accesorios (necesarios para realizar las medidas).
- d. Softwares (programas para lectura e interpretación de las mediciones).

Estos sistemas son capaces de leer hasta 11 propiedades eléctricas de los materiales a diferentes frecuencias.

- i. Analizadores vectoriales de redes.

Es uno de los dispositivos encargados de medir las propiedades dieléctricas de los materiales.

Hay varios modelos y cada uno cubrirá un rango de frecuencias.

El analizador vectorial de redes consta de una fuente, que se encarga de emitir la onda, un lector de ondas y un display.

El principio de funcionamiento es sencillo. Una medición de la reflexión y/o transmisión de la onda a través de un material junto con el conocimiento de la onda inicial, sus dimensiones y propiedades físicas proporciona la información para caracterizar la permitividad ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ) del material. A continuación se muestra un esquema de un analizador vectorial de redes:

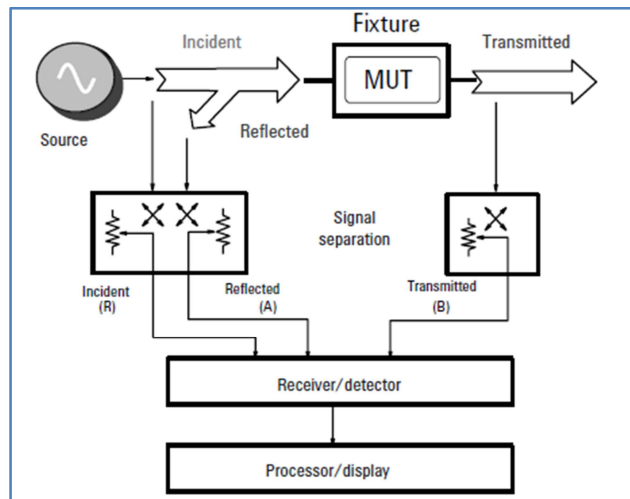


Ilustración 15. Esquema analizador vectorial de redes.

Para diseñar la circuitería las empresas han de tener en cuenta el distinto comportamiento que tienen los materiales y por consecuencia los elementos de medida a diferentes frecuencias. Estos elementos no se comportan igual a bajas que a altas frecuencias. Es decir, hay que dimensionar correctamente los circuitos. Esto es aplicable para el resto de medidores.

ii. Medidores LCR y analizadores de impedancia.

A diferencias de los anteriores son usados para medir las propiedades a frecuencias menos energéticas, por lo que son los más utilizados para el uso microondas; sin embargo muchos de los métodos de ensayo sólo trabajan con analizadores vectoriales.

A continuación se muestra un esquema de los distintos sistemas de medida explicados y las frecuencias más óptimas de trabajo.

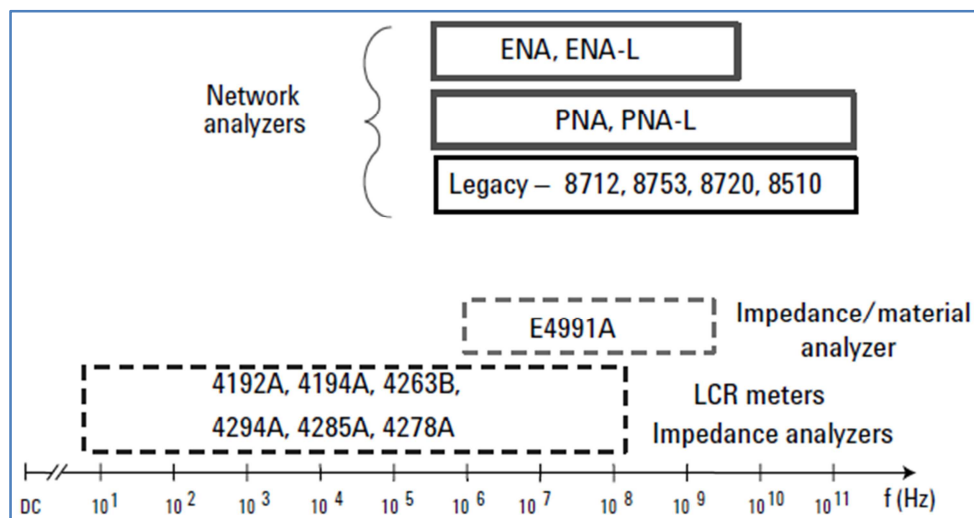
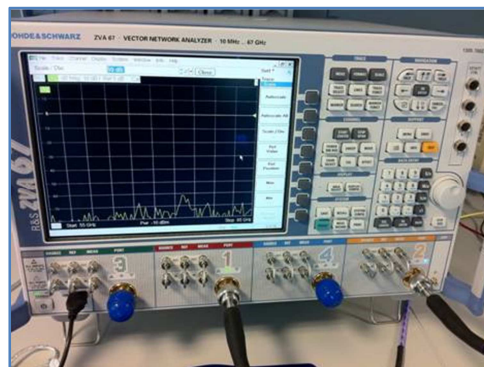


Ilustración 16. Comparativa de frecuencias con sistemas de medida.

Como se observa en la imagen los medidores LCR al igual que los analizadores de impedancia trabajan en el rango de frecuencias del microondas. Será el dispositivo elegido para calcular las propiedades de los materiales.

Los nombres dentro de cada barra corresponden al nombre del modelo de los medidores, en este caso “Agilent Technologies”. Más adelante se explicará cada modelo y posteriormente el uso.

A continuación se muestra una imagen de un analizador prototipo:



**Ilustración 17. Imagen del sistema de medida.**

En un medidor LCR se consideran dos facetas, el diseño del instrumento de medida y la caracterización de la impedancia del componente bajo test.

Un medidor LCR es una pieza de equipo de prueba electrónico utilizado para medir la inductancia (L), capacitancia (C), y la resistencia (R) de un componente, aunque como se verá más adelante son capaces de leer más propiedades. En las versiones más simples de este instrumento no mide los verdaderos valores de estas variables; más bien la impedancia se mide internamente y se convierte para la visualización de la capacitancia correspondiente o el valor de la inductancia. Las lecturas serán razonablemente precisas si el condensador o inductor de la muestra bajo prueba no tiene un componente de resistencia significativo de impedancia. Los diseños más avanzados miden cierto inductancia o capacitancia, y también la resistencia en serie equivalente de los condensadores y el factor Q (factor de pérdida) de componentes inductivo.

A continuación se muestra un listado con sus siglas en inglés de todas las características que pueden ser medidas:

- $|Z|$  = Valor absoluto de la impedancia.
- $|Y|$  = Valor absolute de la admitancia.
- L = Inductancia.
- C = Capacitancia.

- $R$  = Resistencia.
- $G$  = Conductancia.
- $D$  = Factor de dispersion.
- $Q$  = Factor de calidad.
- $R_s$  = Resistencia en serie equivalente.
- $R_p$  = Resistencia en paralelo equivalente.
- $X$  = Reactancia.
- $B$  = Suceptancia.
- $\theta$  = Ángulo de la fase.

### Circuitos y métodos de medida (Dependencia de la frecuencia)

Las técnicas de medida empleadas por los medidores LCR dependen del intervalo de frecuencias de interés. La siguiente figura ilustra lo mencionado.

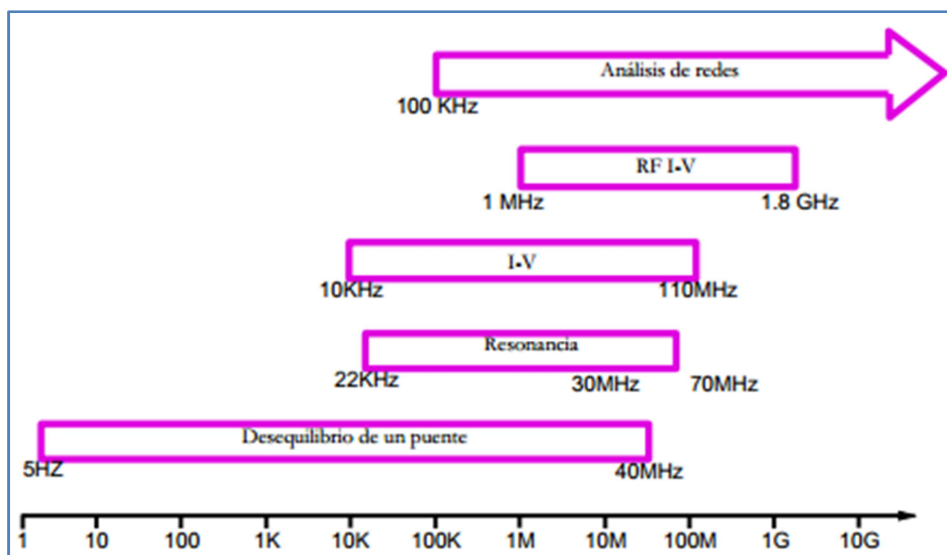


Ilustración 18. Intervalo de frecuencias.

No todos los LCR miden la misma cantidad de propiedades, depende de la calidad de éste y se ve reflejado en el precio.

Existen 2 grandes grupos, de mano (más sencillos) y de sobremesa (más completos). A continuación se muestra una imagen de ambos.



**Ilustración 19. Comparativa medidores.**

Medidores LCR de mano suelen tener frecuencias de prueba seleccionables de 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz y 100 kHz. La capacidad de resolución de pantalla y la medición normalmente cambian con frecuencia de prueba. Suelen ser utilizados como elementos de control respecto a los de sobremesa.

Los medidores LCR de sobremesa suelen tener frecuencias de prueba seleccionables de más de 100 kHz. A menudo incluyen posibilidades para superponer una tensión continua o corriente de la señal alterna. Además estos medidores de mesa permiten el uso de accesorios especiales para medir los componentes SMD, bobinas de núcleo de aire o transformadores.

Por lo general, MUT (la muestra bajo test) se somete a una fuente de voltaje de CA. El medidor mide el voltaje y la corriente a través del MUT.

Con esta relación un medidor o un analizador pueden determinar la magnitud de la impedancia. El ángulo de fase entre la tensión y la corriente también puede ser medido en instrumentos más avanzados; en combinación con la impedancia, la capacitancia equivalente o inductancia, y la resistencia del MUT se pueden calcular los parámetros necesarios para el estudio.

Los medidos pueden conectarse en serie o paralelo siendo la primera la opción más utilizada.

La medición de microondas es complicada, y antes de medir las propiedades dieléctricas con los analizadores vectoriales de redes o los medidores LCR son necesarias unas precauciones previas. De hecho, una correcta calibración de esta medición es necesaria para evitar los errores sistemáticos que pueden aparecer por las imperfecciones del sistema de medida.

A parte de un correcto dimensionamiento de la cavidad, colocación y dimensionamiento de la muestra hay otros errores que pueden aparecer debido al ruido, deriva o entorno (temperatura, humedad y presión) que no se pueden eliminar con una correcta calibración, hay que tenerlos en cuenta. Esto hace que la medición de microondas sea susceptible a tener errores con pequeños cambios en el sistema de medida.

Como se comentó; estos errores no pueden ser eliminados pero sí minimizados adoptando unas buenas prácticas de medidas, como manteniendo el sistema limpio y sin dañarlo.

Existen varias compañías a nivel internacional que fabrican estos sistemas. En la siguiente tabla se muestran las compañías existentes, modelos, medidas y precios:




iii. Accesorios de medida:

Antes que las propiedades dieléctricas de los materiales puedan ser medidas con los sistemas explicados anteriormente es condición necesaria que los campos electromagnéticos aplicados sean predecibles y que permitan la conexión con los instrumentos de medida. Estos accesorios de medida van a depender de la técnica de medida y las propiedades físicas del material (sólido, polvo, líquido o gas). Es decir, hay que hacer un estudio ponderado previo a la medición.



Celdas dieléctricas:

Son las encargadas de “sujetar y fijar la muestra”. Según las necesidades hay varias clases. A continuación se muestran algunas de ellas:

Tabla 4. Accesorios 1.

CLASE (Cell LD-3)	FRECUENCIAS	DISEÑO	TEMPERATURA
	50 Hz – 1 MHz	materiales planos y rígidos	
CLASE (Cell LD-3T)	FRECUENCIAS	DISEÑO	TEMPERATURA
	50Hz to 1MHz	materiales planos rígidos a elevadas temperaturas en un horno	200°C
CLASE (Cell 350G)	FRECUENCIAS	DISEÑO	TEMPERATURA
		Proceso líquido Diseñado para usar con: aceites, solventes, agua; productos químicos no viscosos, sales	
CLASE (Cell MC-100)	FRECUENCIAS	DISEÑO	TEMPERATURA






		Diseñado para utilizarse con: Pega, grasa, material muy viscoso, los líquidos, en polvo	
<b>CLASE (Cell MC-100)</b>	<b>FRECUENCIAS</b>	<b>DISEÑO</b>	<b>TEMPERATURA</b>
		Herramienta inestimable en la verificación de la operación de cualquier célula dieléctrico rígido, tal como el LD-3T LD-3	

Accesorios del producto:

Paralelamente a los distintos medidores los fabricantes diseñan accesorios que mejoren las mediciones. Cada uno estará destinado a un uso y máquina.

En la siguiente tabla se muestran los más importantes.

**Tabla 5. Accesorios 2.**

<b>Transformer Test Fixture</b>	
<b>Alligator Clip Lead</b>	
<b>16048A Test Lead (BNC Connector, with BNC Connector Board)</b>	

### 16117C Low Noise Test Leads



Existen muchos más, pero su uso no es fundamental. Además, cada casa comercial condiciona su uso.

#### Software:

Los datos de medida de los instrumentos normalmente no están en el formato correcto, por lo que no pueden ser leídos. Por lo que es necesario un software que “transforme” las medidas en permitividad y permeabilidad. También es necesario un programa que detecte y analice cualquier interacción entre los accesorios y la MUT (material bajo test) que permita conocer las propiedades del material.

El plazo de entrega oscila entre 1, 2 y 3 semanas, aunque hay dispositivos que se pueden demorar un mes. La garantía suele oscilar los 3 años como máximo.

Para facilitar la búsqueda de información sobre empresas existen 2 páginas que comparan las distintas marcas, los enlaces son los siguientes:

- <http://www.testequipmentdepot.com/newequipment/newlcrmeters.htm>
- <http://www.testequity.com/categories/LCR+Impedance/LCR+Meter/>

#### IV. Sistemas de medida alternativos:

La constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) puede ser medida de la siguiente manera, primero, se mide la capacidad de un condensador de prueba en el vacío ( $C_0$ ) (o con aire si se acepta un pequeño error), luego, se usa el mismo condensador a la misma distancia entre placas y se mide la capacidad con el dieléctrico insertado entre ellas ( $C$ ).

La constante dieléctrica puede ser calculada como:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (16)$$

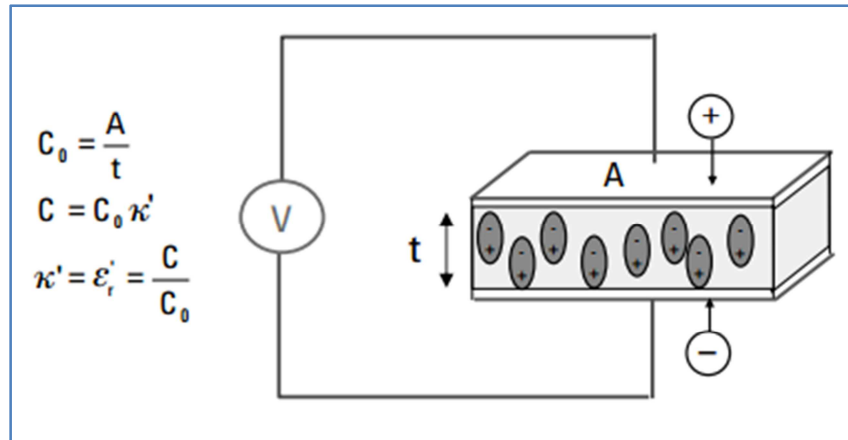


Ilustración 20. Funcionamiento dieléctrico. Condensador.

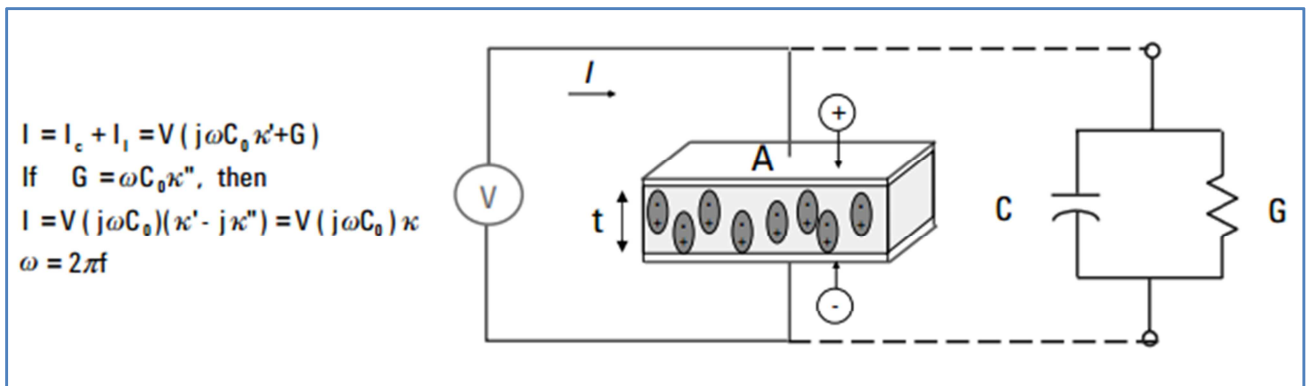
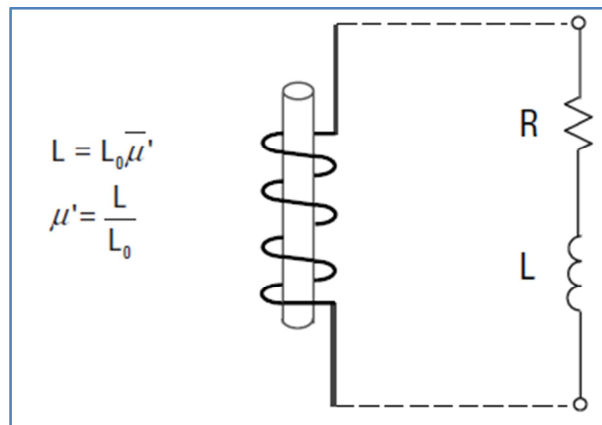


Ilustración 21. Circuito complementario al condensador.

Si a ese condensador se le aplica una tensión senoideal de corriente alterna a una frecuencia  $x$ , la intensidad resultante de la malla actual se compone de una corriente ( $I_c$ ) de carga y la corriente de pérdida ( $I_l$ ) (Aplicando Kirchoff) que está relacionada con la constante dieléctrica. Las pérdidas dieléctricas en el material se pueden representar como una conductancia ( $G$ ) en paralelo con un condensador ( $C$ ).

Al igual que el caso de la constante dieléctrica el cálculo de la parte real de la permeabilidad se puede calcular con bobinas, una en el vacío y otra con el material dieléctrico. Mantiene los subíndices del caso anterior se tiene:

$$\mu' = \frac{L}{L_0} \quad (17)$$



**Ilustración 22. Funcionamiento dieléctrico. Bobina.**

Si una corriente senoideal de corriente alterna alimenta al inductor/bobina, la tensión resultante estará formada por una tensión inducida y una tensión de pérdida que está relacionada con permeabilidad. La pérdida en el núcleo puede ser representada por una resistencia (R) conectada en serie con un inductor/bonina (L).

### e. Elección del método según las necesidades:

Como ya se ha explicado anteriormente, las propiedades dieléctricas fluctúan mucho al ser medidas, todo equipo de investigación ha de decidir cuál de los métodos es el que mejor encaja con su meta.

¿Cuál técnica es mejor?, depende de: (se vuelve a hacer referencia).

1. Frecuencia.
2. Valor esperado.
3. Exactitud de la medida.
4. Propiedades del material (si es homogéneo o isótropo).
5. Estado del material (si se encuentra en estado sólido, líquido, gaseoso o polvo).
6. Dimensiones de la muestra.
7. Limitaciones del tamaño (muy grande o pequeña para ser medida).
8. Temperatura.
9. Ensayos destructivos o no destructivos.
10. Contacto entre sistema y muestra o sin contacto.

Como se observa escoger que técnica es mejor depende de muchas variables. Cada método tiene sus propias ventajas y limitaciones que lo hacen más o menos útil para una u otra aplicación.

En un intento por simplificar, en la siguiente imagen se muestra las distintas técnicas de medición existentes mapeadas en una tabla. Los ejes son dos factores determinantes para decidir cuál es la técnica a elegir. En el eje x tenemos frecuencias de interés, desde el mínimo MHz al máximo, 500GHz. El eje y representa la pérdida; por lo que en la parte inferior tenemos materiales de baja pérdida y en la parte superior, los materiales de altas pérdidas (aquellos fácilmente calentados).

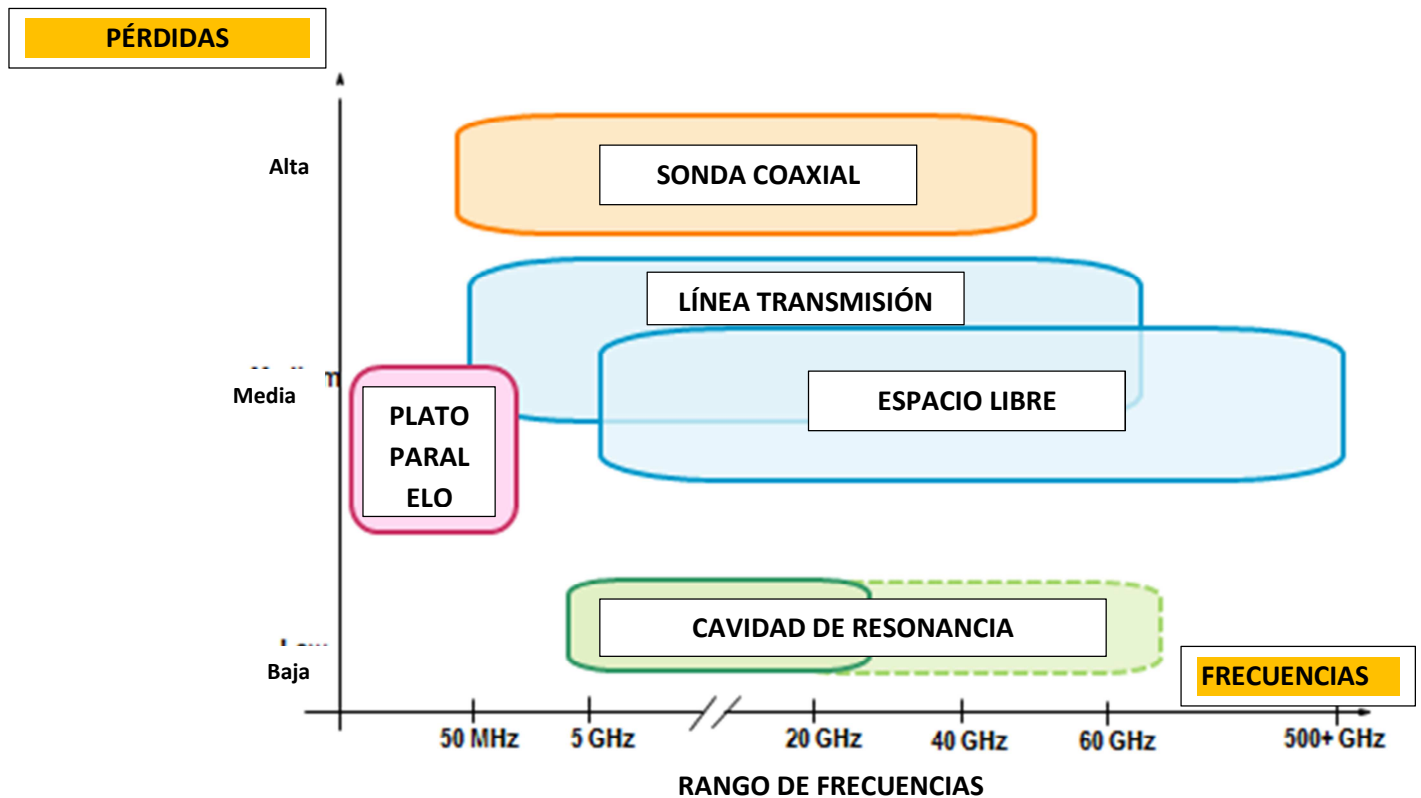


Ilustración 23. Comparativa de ensayos.

Se comenzará explicando los ensayos de manera genérica, es decir, aquellos útiles para calcular las propiedades dieléctricas de los minerales de hierro y del coque como los que no son útiles. Si bien al final del apartado se mostrará una tabla mostrando cuales son los más idóneos.

Más adelante, en el diagrama de flujo, se explicará en profundidad y se intentará marcar cuales de ellos son las más indicados para estos materiales siderúrgicos.

## f. Ensayos:

A continuación se desglosarán las técnicas existentes y se profundizará en cada una de ellas, son las siguientes:

- Coaxial probe (Sonda coaxial).
- Transmission line. (Línea de transmisión).
- Free Space. (Espacio libre).
- Resonant cavity. (Cavidad de resonancia).
- Parallel plate. (Plato paralelo).

i. Coaxial probe (Sonda coaxial).

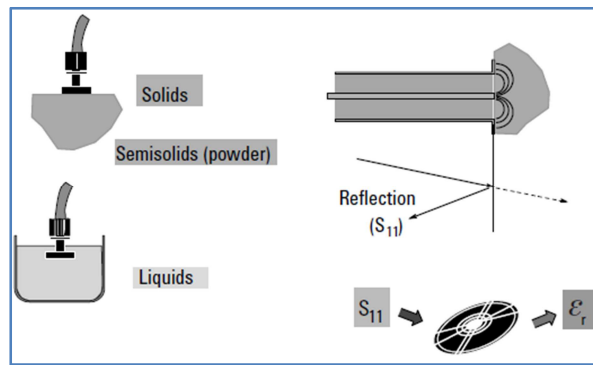
El rango de frecuencias de la técnica está comprendido entre los 200MHz y los 50GHz. Es idónea para los materiales que tienen pérdidas. Se puede emplear en el mundo de la medicina, radiografías, pruebas de tasa de absorción específica, muestras de tejidos etc.

Supuesto del material y método:

- Banda ancha.
- Ensayo no destructivo.
- Precisión de ( $\epsilon_r$ ) baja.
- Baja resolución de ( $\tan \delta$ ).
- Mejor resultado para líquidos y semisólidos (polvo).
- Materiales no magnéticos.
- Materiales isotrópicos y homogéneos.
- Superficie plana.
- Sin “bolsas” de aire.
- Gran espesor.

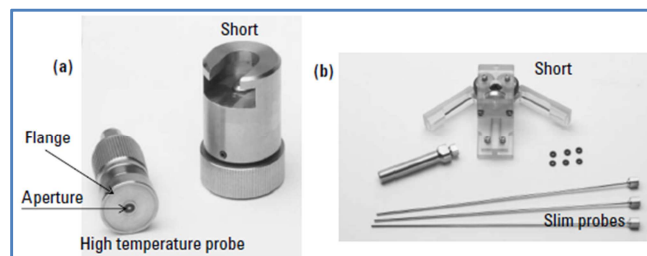
Un sistema típico de sonda coaxial consta de un analizador vectorial de redes y la propia sonda abierta (más los accesorios requeridos). El software controla el analizador de redes para calibrar el instrumento, establecer las medidas, calcular y mostrar los resultados. Además hay un interfaz programable de aplicaciones en el software de modo que las mediciones se pueden automatizar aún más.

Las propiedades son medidas sumergiendo la sonda en un líquido conductor o bañando la superficie plana del sólido con él. El cambio de la frecuencia entre los distintos medios mide las propiedades dieléctricas.



**Ilustración 24. Esquema funcionamiento sonda coaxial.**

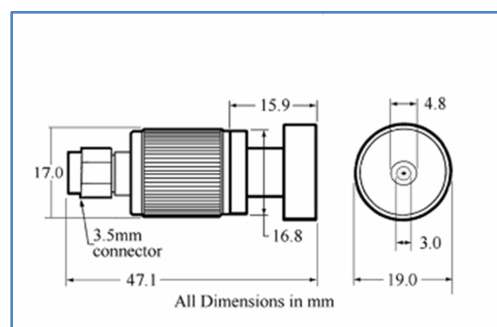
La siguiente figura muestra las dos sondas que están disponibles; la sonda de alta temperatura (a) y la sonda de forma delgada (b).



**Ilustración 25. Accesorios sonda coaxial.**

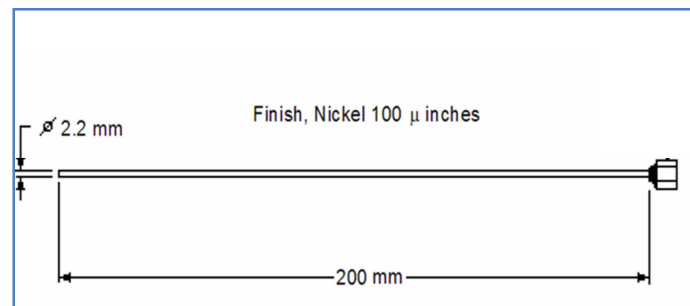
Algunos fabricantes están empezando a ofrecer tres diseños de la sonda. Cada una con sus limitaciones y fortalezas.

- Sonda de alta temperatura: Tiene la cobertura de frecuencia más baja de todas las sondas. Puede ser utilizada con un analizador de impedancia a 10 MHz. Puede soportar un rango de temperatura entre  $-40$  y  $200^{\circ}\text{C}$ . Está hecha de una aleación de acero inoxidable con un sello de vidrio de boro-silicato que la protege de la corrosión. La brida grande hace que sea un poco más fácil para medir los materiales sólidos de espesor constante.



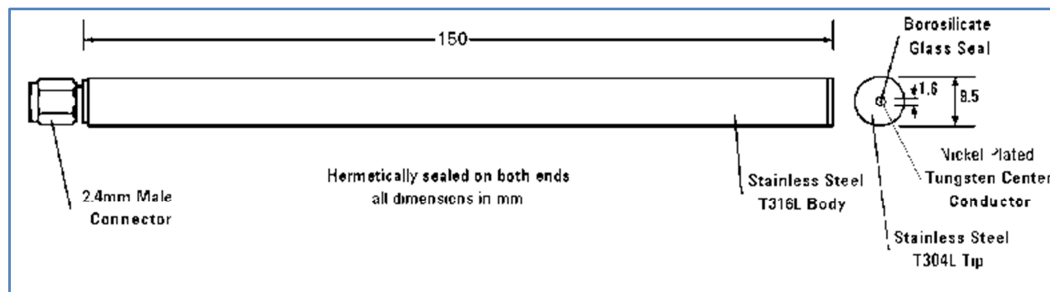
**Ilustración 26. Sonda de temperatura.**

- Sonda delgada: tiene bajo coste. Puesto que el diámetro exterior es menor que la sonda de alta temperatura, funciona a frecuencias más altas, entre los 500 MHz a los 50GHz. Como el coste de la sonda es reducido se puede utilizar en ensayos destructivos. Por su diseño cabe en espacios reducidos y tamaños de muestra más pequeños. Es ideal para líquidos y semi-sólidos blandos.



**Ilustración 27. Sonda ensayos destructivos.**

- La sonda “performance”: es un diseño intermedio entre las dos sondas anteriores que permite trabajar en altas frecuencias (0.500 – 50GHz) y un rango de temperaturas altas (-40 y 200<sup>0</sup>C). Además, se sella herméticamente en ambos extremos por lo que es ideal para aplicaciones que necesitan equipo estéril, al igual que la sonda de alta temperatura presenta resistencia corrosiva.



**Ilustración 28. Sonda intermedia.**

Un sistema de línea de transmisión típica consta de:

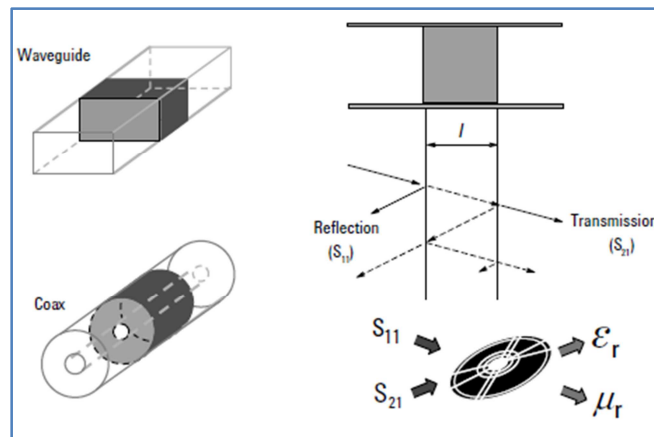
- Un analizador vectorial de redes.
- Un kit de calibración apropiado.
- Un soporte de muestra conectado entre los dos puertos del analizador de red

ii. Transmission line. (Línea de transmisión).



La técnica de la línea de transmisión tiene un rango de frecuencia de 50 MHz hasta los 75GHz. Por encima de 75GHz se hace difícil para adaptarse a una muestra en la línea de transmisión de microondas.

Los métodos de línea de transmisión implican colocar el material dentro de una guía como se observa en las imágenes. La guía es por lo general de sección rectangular o coaxial presenta un orificio en su interior tal como se indica en la siguiente imagen. ( $\epsilon_r$ ) y ( $\mu_r$ ) se calculan a partir de la medición de la señal reflejada ( $S_{11}$ ) y la señal de transmisión ( $S_{21}$ ). Es decir, la pérdida de intensidad de la onda electromagnética.

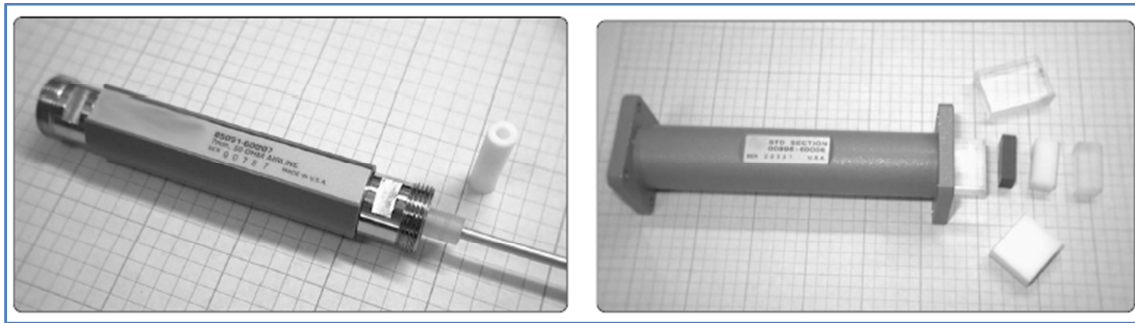


**Ilustración 29. Esquema de funcionamiento de línea de transmisión.**

Supuesto del material y método:

- La muestra ha de estar perfectamente ajustada a la guía.
- La sonda ha de llenarse por completo.
- Entre las caras de la guía y el material no debe de haber aire.
- Caras planas lisas, perpendiculares al eje largo.
- Muestra homogénea.
- Espesor conocido  $> 20/360 \lambda$ .
- Banda ancha de baja gama limitada por la longitud de la muestra.
- Se limite a la resolución de materiales con pérdida media.
- Permite medir materiales magnéticos.
- Permite medir materiales anisótropos.
- Medidas buenas de las propiedades dieléctricas.

A continuación se muestra las 2 clases de guías usadas en los experimentos:



**Ilustración 30. Guías de línea de transmisión.**

Un sistema de línea de transmisión típica consta de:

- Un analizador vectorial de redes.
- Un kit de calibración apropiado.
- Un soporte de muestra conectado entre los dos puertos del analizador de red

A diferencia de la técnica de la sonda coaxial de la muestra no se supone “infinita”. Como se va a medir tanto la reflexión y la transmisión a través del material se necesita saber el grosor de éste. La muestra debe ser lo suficientemente larga para “contener” la suficiente longitud de onda. Lo ideal y recomendable serían muestras a partir de 20 grados.

Al igual que con la técnica de sonda coaxial. Normalmente los fabricantes ofrecen un software y diversas variedades de soportes.

### iii. Free Space. (Espacio libre).

Con la técnica de espacio libre, se puede recorrer todo el “camino” de frecuencias hasta 500GHz e incluso superarlos. Sin embargo para las frecuencias más bajas las mediciones empiezan a ser poco precisas. Por ejemplo, para frecuencias entre 3-6 GHz se requieren muestras de gran tamaño que no se pueden ajustarse al instrumental.

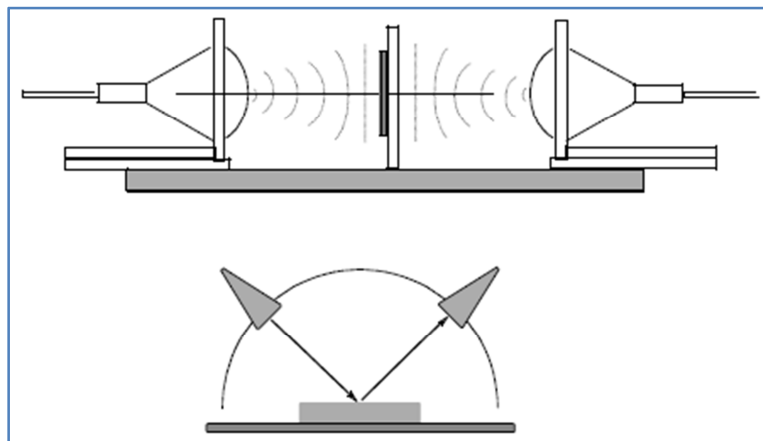
La técnica de espacio libre es una variación de la línea de transmisión siendo más práctica ya que se puede trabajar con muestras mayores utiliza los mismos algoritmos para calcular la permitividad y permeabilidad.

Un sistema de línea de transmisión típica consta de:

- Un analizador vectorial de redes.
- Un kit de calibración apropiado.
- Dos antenas.
- Un soporte de muestra conectado entre los dos puertos del analizador de red.

Se utiliza antenas para focalizar la energía de microondas sobre la muestra del material sin necesidad de ningún ajuste como se muestra a continuación.

La muestra de material ha de llenar completamente la sección transversal y plana del dispositivo de fijación sin espacios de aire entre muestra y célula de fijación. Al igual que otras técnicas como se van a medir tanto la reflexión y la transmisión a través del material se necesita saber el grosor. La muestra debe ser lo suficientemente larga para contener suficiente de la longitud de onda. Lo ideal y recomendado sería un mínimo de 20 grados.



**Ilustración 31. Esquema de funcionamiento de espacio libre.**

Características de las muestras:

- Muestras planas, largas y con caras paralelas.
- Muestras homogéneas.
- Muestras paralelas de cara plana.
- Muestra en la región no-reactiva.
- Viga de punto está contenido en la muestra.
- Espesor conocido  $> 20/360 \lambda$ .

Característica del método:

- Ensayo sin contacto y no destructivo.
- Alta frecuencia limitado por el tamaño de la muestra.
- Útil para alta temperatura.
- La antena se puede calibrar para materiales anisótropos.
- Permite la medida de materiales magnéticos.

Al no existir contacto entre la muestra y el experimentador se pueden hacer estudios a alta temperatura y condiciones hostiles para estudiar como varían las propiedades dieléctricas en función de la temperatura.

Es un método complicado de medida, es un reto calibrar el analizador con método "free space".

Ambas técnicas expuestas anteriormente, línea de transmisión y espacio libre, son las mejores para la caracterización de permitividad, así como la permeabilidad de los materiales con pérdidas medianas. Materiales con altas pérdidas se pueden medir si la muestra se mantiene con una estructura delgada. Algunos ejemplos de materiales que son adecuados para ser medidos por la técnica de línea de transmisión son materiales sólidos duros que se puedan mecanizar o conformar para caber dentro de un soporte de muestras de línea de transmisión, arena u otros polvos que se puedan ajustarse en su interior. Los materiales comunes medidos con la técnica de espacio libre están relacionados con la aeronáutica y recubrimientos.

La técnica de espacio libre es mejor para materiales delgados de caras planas y paralelas, u otros materiales que se puedan conformar con esa forma.

La muestra debe estar lo suficientemente lejos de las antenas para estar fuera de la región reactiva.

#### iv. Cavidad de resonancia.

Para las mediciones de permitividad con la exactitud más alta para materiales de muy baja pérdida, se utiliza la técnica de cavidad resonante. El rango de frecuencia común para esta técnica es en el rango de 1 GHz a 20 GHz, aunque accesorios resonantes se pueden alcanzar frecuencias mayores.

Características de la muestra:

- Entornos de alta impedancia.
- Medidas razonables para muestras de pequeñas dimensiones.
- Útil para materiales de baja pérdida.
- Mediciones en una sola o varias frecuencias.

Técnicas de banda ancha:

- Entorno de baja impedancia.
- Requiere muestras más grandes para obtener mediciones razonables.
- Medición en "cualquier" frecuencia.

El sistema de cavidad resonante consiste en un analizador de red vectorial, un accesorio de cavidad resonante conectado entre dos puertos. Y el software para calcular la permitividad a partir de las mediciones del analizador de red. Esta permitividad se calcula a partir de dos mediciones de la frecuencia de resonancia y el factor de calidad, también llamado factor Q. Primera medición es de la cavidad vacía y la segunda es de la cavidad con la muestra insertada.

En la siguiente imagen se muestra como funciona el software más el dispositivo y qué mide.

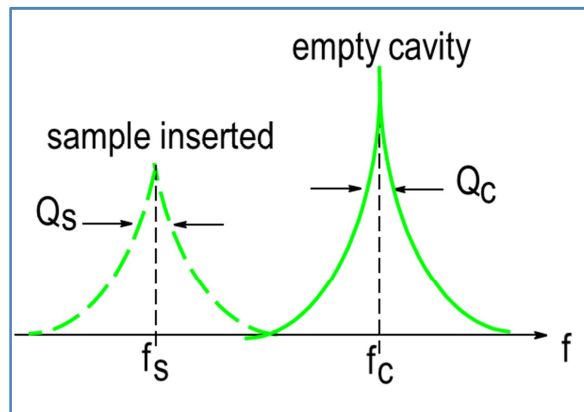


Ilustración 32. Ejemplo medida.

Siendo:

- $f_c$  = frecuencia de resonancia de la cavidad vacía.
- $f_s$  = frecuencia de resonancia de la cavidad llena.
- $Q_c$  = Q de la cavidad vacía.
- $Q_s$  = Q de la cavidad llena.
- $V_s$  = Volumen de la cavidad vacía.
- $V_c$  = Volumen de la muestra.

Por último; La técnica de cavidad resonante es particularmente adecuada para materiales de películas finas. El espesor de la muestra resulta ideal de 1 mm o por debajo. Para frecuencias más bajas la muestra tiene que ser más grande y para las frecuencias más altas la muestra debe ser menor.

v. Discos paralelos.

Los discos paralelos se utilizan para la medición de permitividad de materiales de baja pérdida bajo frecuencias de MHz a 1GHz. Algunos ejemplos de uso son sustratos electrónicos y materiales de película delgada.

La muestra se coloca como el dieléctrico en un condensador de placas paralelas modo “sandwich” tal como se muestra en la figura. La permitividad se calcula a partir de conocer el área de la placa y el espesor de la muestra.

$$\epsilon' = \frac{C}{\epsilon_0 \frac{A}{t}} \quad \tan \delta = D \quad (18)$$

La medición de la capacitancia se calcula utilizando un medidor LCR o analizador de impedancia. En la mayoría de los analizadores el cálculo es automatizado, haciendo de esta una técnica conveniente para medir con precisión la permitividad de materiales en láminas a frecuencias bajas.

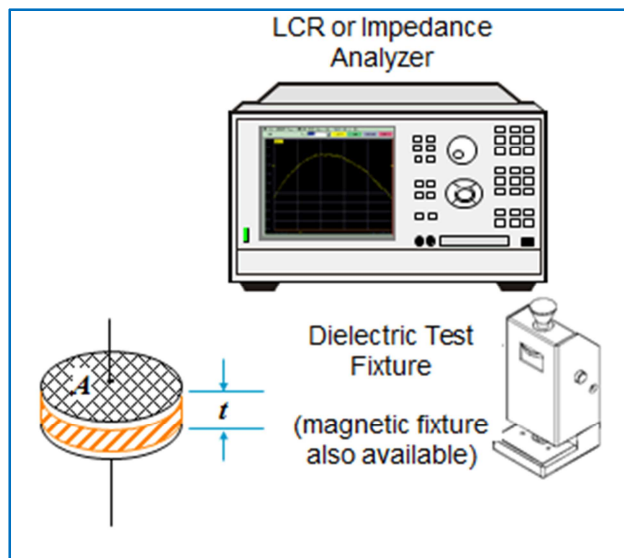


Ilustración 33. Esquema ensayo discos paralelos.

### g. Conocimiento de la reflexión de la onda:

Existe otra propiedad que podemos conocer y resulta muy interesante a la hora de catalogar los materiales, es la reflectividad.

Otra medida que se puede obtener con la técnica del espacio libre es la reflectividad. Además de la permitividad y la permeabilidad, a menudo es necesario conocer la reflexión en dB en cualquier ángulo dado.

El sistema incluye: arco como accesorio para sujetar la antena y de la muestra, un analizador de redes, cables y adaptadores según sea necesario más el software encargado de leer los resultados.

El arco permite al usuario ajustar el ángulo de las antenas que se utilizan mientras se mantiene una distancia constante a la muestra. La muestra a medir (MUT) puede ser un absorbente tal como se ilustra o un material destinado a ser aplicado a una superficie metálica. El analizador de observa y analiza la onda incidente y reflejada (S21) sobre el MUT en dB.

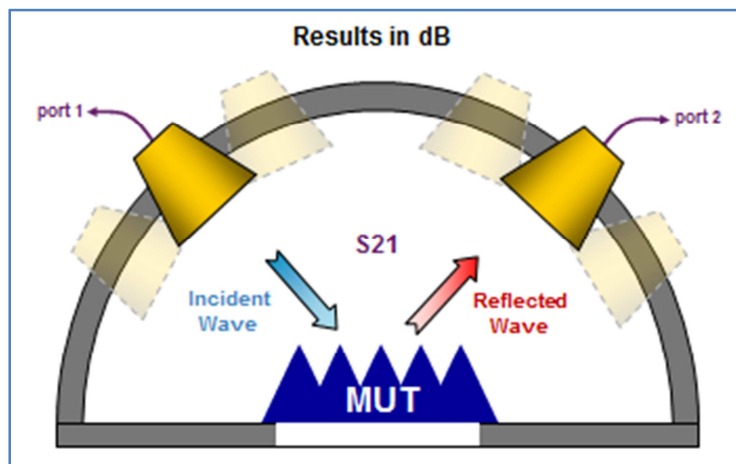


Ilustración 34. Reflexión de la onda.

## h. Conclusiones:

### Comparativa entre los distintos métodos.

En la comparación de los métodos influyen muchos factores que se han de tener en cuenta a la hora de escoger el más adecuados; estas variables pueden ser la precisión, la forma del material, frecuencias o trabajar a altas temperaturas y son importantes a la hora de seleccionar la técnica de medición más adecuada. Algunos de los factores importantes a tener en cuenta se resumen a continuación:

- Rango de frecuencias.
- Los valores esperados de ( $\epsilon_r$ ) y ( $\mu_r$ ).
- Precisión de medición requerida y preparación de ésta.
- Propiedades de los materiales, es decir, homogéneo o isótropo.
- Forma del material polvo, sólido, hoja.
- Estado del material, líquido o sólido.

- Las restricciones de tamaño de la muestra
- Técnica destructiva o no destructiva
- Contacto o sin contacto.
- Temperaturas.
- Costo

Como se ha podido observar existen técnicas de resonancia y técnicas de transmisión.

Lo primero que hay que tener en cuenta para los dos grupos es la susceptibilidad de las mediciones de materiales con pérdidas bajas tales como sustratos de cerámica o materiales compuestos.

Las técnicas basadas en la resonancia tienen mejor precisión y la resolución para la medición de la parte imaginaria de la permitividad y la tangente de pérdida.

La precisión de las técnicas de resonancia se determina por el factor  $Q$ .

La precisión de las técnicas de transmisión se determina en gran medida por la calidad de los vectores de calibración

En resumen y de forma ideal cada una de las técnicas será mejor que otra según el tipo de material, a continuación se mostrarán cada una de ellas con


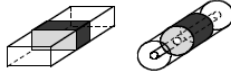
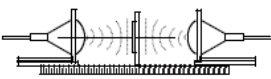
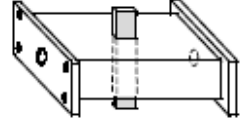
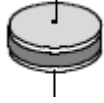
- La técnica de discos paralelos es mejor para medir materiales con pérdidas bajas y medias por debajo 1 GHz.
- La técnica de sonda coaxial es la mejor para la medición de líquidos que presenten altas pérdidas y sólidos conformables a través de una amplia banda de frecuencias. Los sólidos duros se pueden medir, pero los espacios de aire deben ser controlados.
- La técnica de la línea de transmisión es mejor para la medición de permitividad o permeabilidad de la pérdida de sólidos de dureza media y de otros materiales que puedan fijarse en el interior de la guía.
- La técnica de transmisión de espacio libre es una técnica sin contacto que es muy útil para la medición de permitividad o permeabilidad en la alta gama de frecuencias microondas y mm de la onda.

Los resultados de la técnica de la cavidad de resonancia en un punto complejo único de alta precisión de los datos permisividad de muy baja pérdida o muestras delgadas.



A continuación se muestra un resumen en forma de tabla de los distintos métodos y el uso en los minerales de hierro y el coque. Siendo la de espacio libre la más adecuada para los materiales siderúrgicos.

Tabla 6. Comparativa entre ensayos.

NOMBRE	ESQUEMA	$\mu r$	$\epsilon r$	CARACTERÍSTICAS	M.HIERRO	COQUE
<b>SONDA COAXIAL</b>		NO	SÍ	Cómodo y ensayo no destructivo. Banda ancha. Para líquidos y semisólidos.	SÍ	SÍ
<b>GUÍA DE TRANSMISIÓN</b>		SÍ	SÍ	Sólidos mecanizables. Banda ancha. Bajas pérdidas.	SÍ	SÍ
<b>ESPACIO LIBRE</b>		SÍ	SÍ	Altas temperaturas. Mejor muestras grandes y planas. Sin contacto.	SÍ	SÍ
<b>CAVIDAD RESONANTE</b>		SÍ	SÍ	Preciso. Muestras pequeñas. Bajas pérdidas.	NO	NO
<b>PLATO PARALELO</b>		NO	SÍ	Mejor para bajas frecuencias. Muestras delgadas y planas.	NO	NO

Se ha considerado los ensayos aptos los indicados en la tabla por la geometría de los minerales presentes en la siderurgia, la posibilidad de trabajar a altas temperaturas, rango de frecuencias y su fiabilidad en la medida.

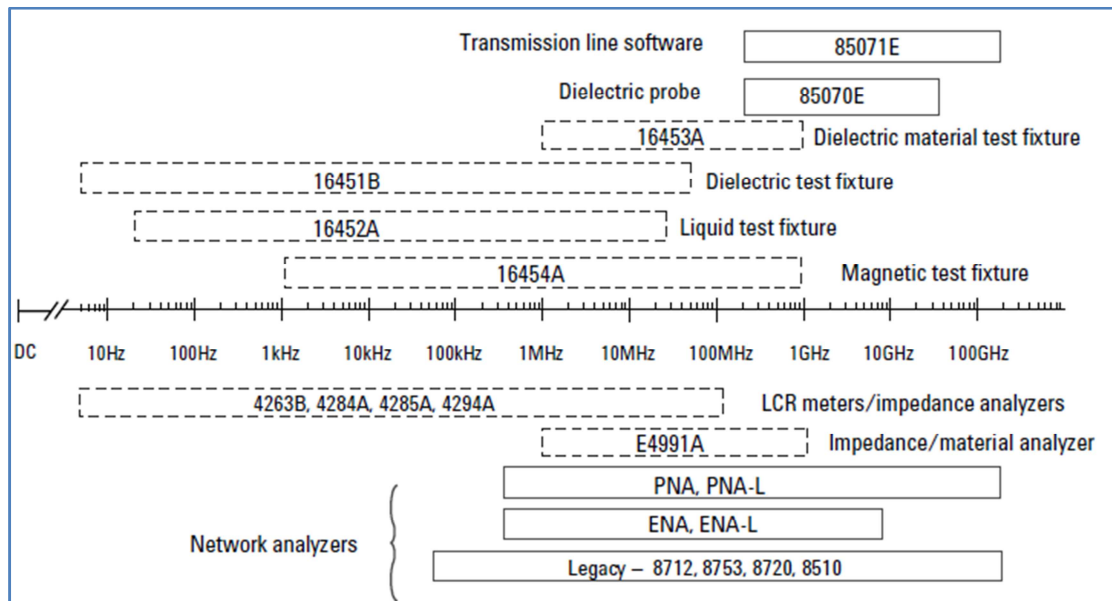


Ilustración 35. Comparativa total.

### Técnica de resonancia de cavidad cilíndrica

Se supone que el cambio de la energía almacenada dentro de la cavidad en condiciones de carga y descargada es muy pequeña. Esto significa que los campos electromagnéticos en la cavidad con y sin la muestra deben ser aproximadamente iguales. Por lo tanto, la dimensiones de la muestra para conocer sus propiedades dieléctricas ha de ser lo más pequeña posible en comparación con el tamaño de la cavidad resultante en un pequeño desplazamiento o cambio de frecuencia.

Además, la simetría de la muestra dentro de la cavidad también es necesaria.

El efecto de la temperatura sobre la medición de partes real e imaginaria de la permitividad se realizó por el método de la cavidad de resonancia modo TM<sub>030</sub> con una frecuencia de 2216 MHz.

Las propiedades dieléctricas medidas fueron medidas a partir del cambio de frecuencia (f) y (Q) que es la energía almacenada por cada ciclo  $Q=1/\tan\delta$ . Medidas antes y después de carga.

Para calcular la parte real e imaginaria de la permitividad se usaron las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon' = 1 + 2 \cdot J_1^2(x_{1,n}) \cdot \frac{V_c}{V_s} \cdot \frac{f_o - f_s}{f_o}, \quad \epsilon'' = J_1^2(x_{1,n}) \cdot \frac{V_c}{V_s} \cdot \left( \frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_o} \right) \quad (19)$$

## 5. GUÍA METODOLÓGICA.

### a. **Introducción:**

Una vez explicados los distintos ensayos y los principales mecanismos dieléctricos el objetivo del presente documento es establecer una serie de pautas para conocer las propiedades dieléctricas de los minerales de hierro y carbón que permita optimizar al máximo el posterior tratamiento por microondas. Como se ha ido documentando a lo largo del trabajo estas propiedades son muy cambiantes, son difíciles de calcular con precisión y no se suele obtener los mismos resultados tras varias mediciones. Para ello, la persona o personas encargadas de las mediciones no se ha de conformar con una medición, tiene que realizar varias para poder hacer una nube de dispersión de datos y utilizando estadística calcular una media.

Es decir, se ha de realizar una recta o curva de regresión que permita saber la variabilidad de los datos, error esperado y media de las mediciones. El número de repeticiones se dejará a gusto de la persona o personas encargadas.

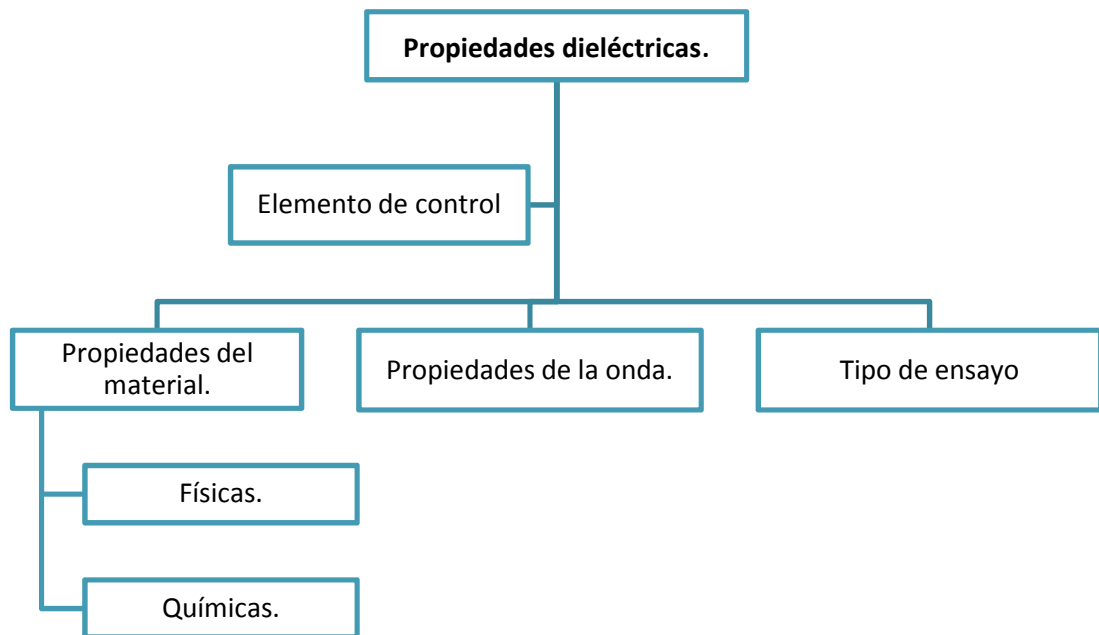
Arcelor-Mittal es una empresa multinacional con política de aguas arriba, abarca todo el proceso productivo del acero para asegurarse el abastecimiento. Las minas están situadas en lugares como Canadá, Rusia o Australia, esto implica que aunque la base de los minerales sea la misma, existen pequeñas variaciones en su composición (impurezas, contenidos en agua, cenizas, cantidad de hierro, comportamiento de la ganga) que hacen variar las propiedades dieléctricas.

Estas impurezas no son las únicas responsables de la variabilidad de estas propiedades. Como se sabe existen otros factores perfectamente localizados que han de tenerse en cuenta a la hora de medir, unos dependen del propio material como las impurezas que se acaban de comentar y otros son ajenos al material. A continuación se muestran:

- El tipo de onda.
  - Frecuencia de onda.
  - Orientación y distribución de la onda.
  - Temperatura del cuerpo sometido a la onda.
  - Estructura molecular del objeto sometido a la onda.
  - Contenido en agua.
  - Presión.
  - Mezcla.
- } AJENAS AL MATERIAL
- } PROPIAS DEL MATERIAL.

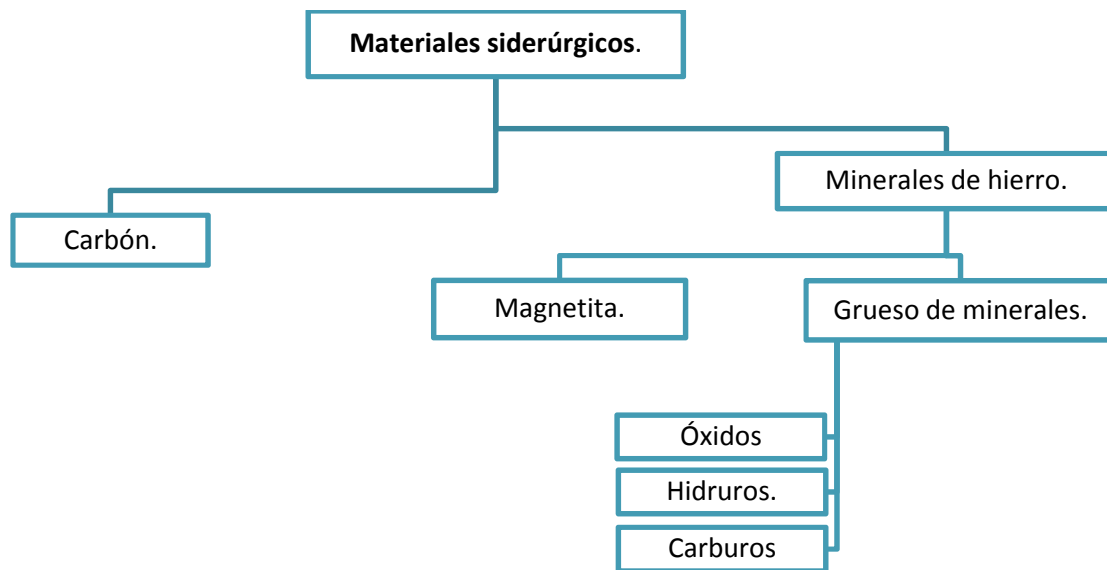
- Porosidad.

Como se observó durante la memoria y será mostrado más adelante en el diagrama de flujo, los ensayos dependen de cuatro aspectos fundamentales, frecuencia de trabajo, estado de la materia, pérdida del material (íntimamente relacionado con la naturaleza dieléctrica del material) y la temperatura. Otros aspectos como el contenido en agua, porosidad, etc no influyen directamente en los ensayos, pero sí en las propiedades dieléctricas. Es importante recordar este aspecto.



No solo hay que hacer una clasificación según lo mencionado anteriormente, como es lógico, el mineral de hierro y el carbón no se comportarán de la misma forma, su química es distinta. Se hace necesario definir las propiedades químicas y físicas de ambos aunque el ensayo sea el mismo para ambos materiales. También hay que distinguir el grueso de minerales de hierro de la magnetita por su propio campo magnético y el ciclo de histéresis que genera la permeabilidad ( $\mu$ ).

A continuación se muestra un esquema de cómo se enfoca el método según los materiales. Aunque se explicará en detalle más adelante.



Otro aspecto importante a tener en cuenta son las propiedades que pueden ser controladas por nosotros a la hora que calcular estas propiedades dieléctricas. Como ya es conocido la variabilidad de las mediciones es elevada, es deseable fijar unas condiciones estándar de trabajo y el uso de la estadística que ayude a la persona encargada.

Para ello, se ha de fijar unas pautas, a continuación se muestra una tabla de ejemplo:

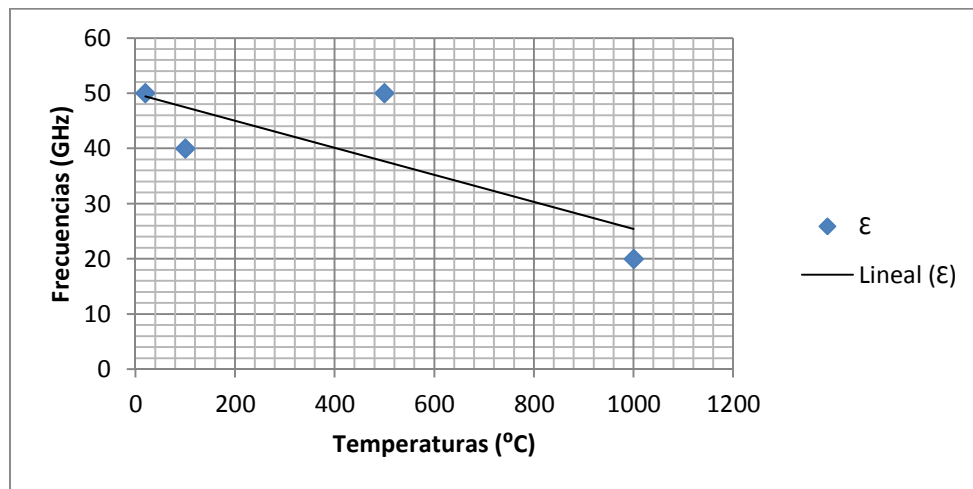
Tabla 7. Tabla guía metódica.

MATERIAL	FRECUENCIA	ESTADO MATERIA	TEMPERATURA	%H2O	ORIGEN/MINA	PROPIEDADES DIELECTRICAS		
						( $\epsilon'$ ) cte	( $\tan \delta$ )	( $\mu$ )
Nombre	GHz	En nuestro caso siempre sólido.			Localización			

Los colores de la tabla tienen un porqué, es el siguiente:

- El color anaranjado muestra los parámetros fijos en las respectivas mediciones.
- El color azul muestra los valores que se podrán ir cambiando en cada medición.
- El verde los resultados.

La idea es ir fijando unos valores de temperatura y frecuencia e ir realizando ensayos hasta obtener una recta o curva de dispersión.



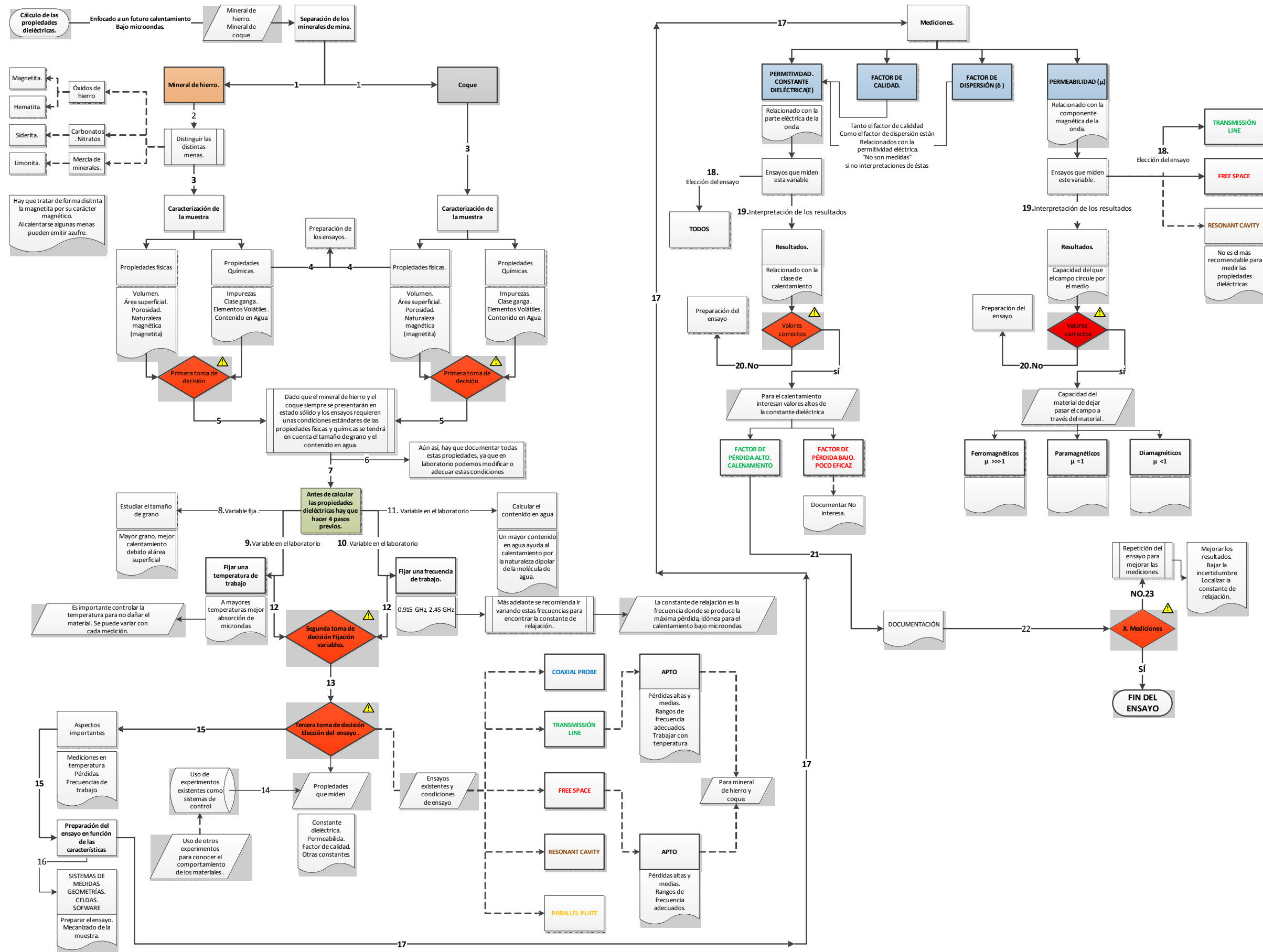
**Ilustración 36. Ejemplo nube de dispersión.**

El ir repitiendo ensayos e ir “jugando” con las frecuencias permite localizar la constante de relajación del material, es decir, el punto de máxima pérdida del material en forma de calor. Dado la meta del proyecto, es más que interesante.

### **b. Diagrama de flujo:**

A continuación se mostraran el diagramas de flujo diseñados en Arcelor-Mittal. En un principio se hay diseñado una más genérico, pero dada la meta del trabajo se redujo al los materiales siderúrgicos en un intento por simplificar el proceso.

A continuación se muestra.



(Se ha implementado junto con el documento los diagramas de flujo es su respectivos formatos para favorecer la comprensión).

### c. Explicación en detalle del diagrama de flujo:

Antes de lanzarse a medir las propiedades dieléctricas hay que seguir una serie de pautas y clasificar los materiales, es importante remarcar que al final, se ha de conseguir una base de datos amplia, como se había dicho anteriormente. Por un lado los distintos minerales de hierro y por el otro el carbón.

#### Mineral de hierro:

1. El primer paso sería almacenar el mineral según su país y mina de procedencia. Ayuda a controlar la composición del mineral y la temperatura de la mina para poder cambiarla en el laboratorio.
2. Segundo, diferenciar en función de la clase de mineral, en el caso del hierro sus principales menas son las siguientes:
  - Magnetita.
  - Siderita.
  - Hematita.
  - Limonita.

Recordar que es recomendable estudiar la magnetita por separado, por ello se recomienda un estudio paralelo al resto.

3. Es necesario un estudio químico del material. Se han de conocer los siguientes puntos:
  - Composición y naturaleza de la ganga.
  - Contenido en hierro.
  - Propiedades del material.
  - Condiciones físicas, principalmente porosidad o compacidad.
  - Grado de pureza (contenidos en P y S principalmente).
  - Grado de humedad y de elementos volátiles, agua combinada y CO<sub>2</sub> que suelen contener.



4. Una vez que se documentan todos estos materiales se han de fijar unas condiciones de trabajo. Se hará especial hincapié en la temperatura, frecuencia y en estado de la materia (siempre sólido en nuestro caso). Estos puntos son los que condicionan de verdad los ensayos, son los siguientes:

### **Carbón:**

Se seguirán las mismas pautas comunes con el mineral de hierro con las variables propias del carbón.

1. Al igual que con el mineral de hierro se ha de almacenar según su procedencia.
2. Se realiza un análisis químico del material:
  - Contenido en agua y gases en la fase no orgánica.
  - Porcentaje de C, O, S y N.
  - Volátiles.
  - Cenizas.

Los siguientes apartados son comunes al hierro, inclusive el ensayo y la técnica utilizada.

3. Una vez que se documentan todos estos materiales se han de fijar unas condiciones de trabajo. Se hará especial hincapié en la temperatura y en estado de la materia.
  - a. Estado de la materia: polvo o sólido.
  - b. Temperatura: al igual que el mineral de hierro medir con la temperatura en mina.
4. Otra vez se documentan las conclusiones y estudios. Se elige el tipo de ensayo, al igual que con el mineral de hierro.

Una vez documentado las variables explicadas en el apartado 3 y fijadas las condiciones de trabajo del apartado 4, se puede empezar a pensar en calcular las propiedades dieléctricas. Por las condiciones de ensayo, el mineral se ha de moler y prensar con unas geometrías dadas por cada ensayo y condicionadas por la célula de ensayo (cada fabricante tiene su metodología).

Pero, ¿cuál de las técnicas es la mejor?, ¿qué tenemos que tener en cuenta? Bien, hay que tener en cuenta:

- Frecuencia del test (trabajar en frecuencia de microondas).
- Valor de ( $\epsilon_r$ ) esperado.
- Precisión deseada.

- Propiedades del material, (homogéneo, isótropo)
- Estado del material, (líquido, polvo, sólido, gaseoso).
- Forma de la muestra.
- Restricciones de forma de la muestra.
- Ensayo destructivo o no destructivo.
- Por contacto o sin contacto.
- Temperatura.

Es conocido de estudios anteriores que el mineral de hierro y el carbón son materiales de altas pérdidas (fácilmente de calentar bajo radiación electromagnética). En la siguiente tabla (ya mostrada en el apartado de propiedades dieléctricas) se puede elegir cual es la más conveniente.

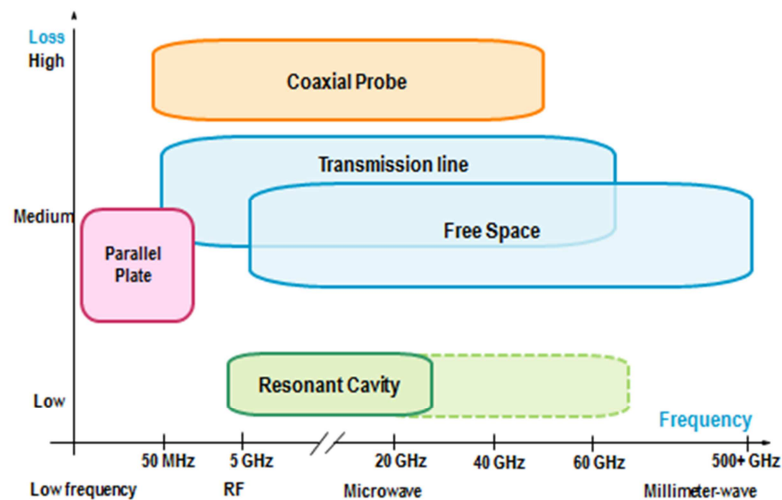


Ilustración 37. Mapeado ensayos dieléctricos.

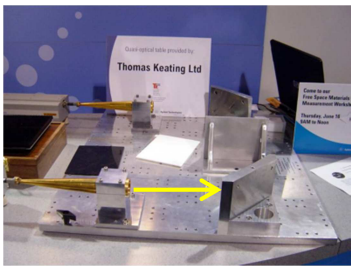
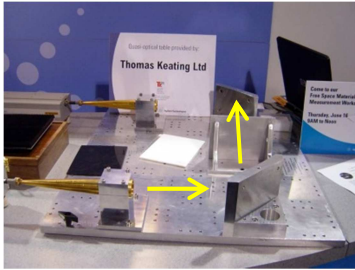
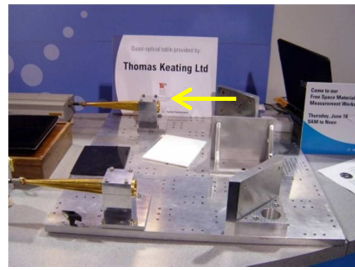
Como se había comentado en apartados anteriores las técnicas escogidas son la línea de transmisión, espacio libre y sonda coaxial. Aunque esta última será “desechada” porque está diseñada para materiales semilíquidos y líquidos. De las otras dos técnicas restantes la más recomendable por no estar en contacto y permitir trabajo con rango de temperaturas es la del espacio libre. Además es la técnica que mejor trabaja en rangos de frecuencia de microondas elevados, que como se ha visto son los mejores para el posterior calentamiento.

Una vez escogida la técnica, se ha de dimensionar la pieza en función de los requisitos del fabricante, para ello utilizaremos un prensa. Una vez prensado se mide su contenido en humedad y por fin, finalmente es medido. Es importante no separar la mena de la ganga para afinar al máximo los resultados del laboratorio respecto a los reales en minas.

Un parámetro que será difícil de solventar es el aspecto de las dimensiones de la piedra del mineral. No existe una geometría definida y puede producir un error entre las mediciones de laboratorio y las reales.

Ejemplo de metodología del ensayo:

**Tabla 8. Ilustración técnica espacio libre.**

		
<p>Emisión de la onda y revote en el espejo.</p>	<p>La onda de microondas pasa a través de la muestra y revota en otro espejo.</p>	<p>La onda revotada llega a una segunda antena.</p>

### **Propiedades de la onda.**

Una vez que el material está listo se le aplica el campo. Normalmente se utilizan analizadores vectoriales de redes, analizadores de impedancia o medidores LCR siendo los primeros los más usados en los ensayos.

Una vez escogido el dispositivo se necesita otro hardware, en este caso un ordenador que nos muestre los datos obtenidos en las mediciones. Para ello, nos apoyaremos en un software especializado, cada empresa tiene un software compatible a su medidor, aunque en algunos modelos viene todo incluido pudiendo leer los datos desde los propios dispositivos de medida.

Hay que fijar unas condiciones de trabajo con la frecuencia del campo electromagnético aplicado, por consiguiente:

- Es necesario fijar una frecuencia de trabajo.
- Diferenciar las frecuencias en función de los ciclos de histéresis que pueden aparecer.
- Si el material es calentado en un horno dentro del propio “circuito” es necesario dimensionar correctamente las dimensiones del horno, a su vez este ha de estar construido de un material transparente a las microondas.
- Hay que establecer unos tiempos y ciclos de exposición.



Por último, es necesario la continua retroalimentación pero reducir la incertidumbre las mediciones.

## 6. CALENTAMIENTOS EXPERIMENTADOS.

### a. Introducción:

En un principio se podría considerar la aplicación de un tratamiento térmico de forma convencional para asistir la molienda de minerales. Este proceso ya fue estudiado en el siglo pasado [Holman, 1926], dado que es conocido que al aplicar calor se provoca la fractura del mineral y con ello un aumento en la facilidad de molienda. Sin embargo, la mayoría de las veces el proceso es energéticamente desfavorable por lo que se desestima su uso [Fitzgibbon, 1990]. Por otro lado, el uso de las microondas para el aporte de energía en procesos industriales de gran volumen de producción, requiere ser estudiado experimental y específicamente para cada proceso y material [Panias, 2004].

Dos ejemplos que representan los dos extremos de la utilización de microondas en la molienda son por un lado la cromita, en la que el tratamiento con microondas mostró tener unos efectos limitados y una pobre variación del índice de trabajo [Guengoer, 1998]. Sin embargo, para facilitar la molienda de la kimberlita y extraer el diamante, la molienda asistida por microondas presenta la ventaja de que sólo la ganga es calentada, de esta manera el diamante se daña mucho menos que en una molienda convencional [Didenko, 2005], ya que no se ve afectado por la radiación y la kimberlita necesitar menos tiempo de residencia en el molino. Como resultado, el producto final son piezas menos dañadas y por tanto de mayor valor. En este último caso, el producto obtenido justifica con creces el uso de las microondas para facilitar la molienda. Pero sin llegar a tales extremos, cuando la liberación de un mineral sea difícil económicamente por métodos tradicionales, se puede intentar aplicar este pretratamiento no convencional [Kingman, 1998].

La efectividad de un pretratamiento con microondas para facilitar la molienda de carbones y minerales de hierro se ha comprobado en el caso de algunos carbones destinados a centrales térmicas, cuyos resultados, a escala de laboratorio, han demostrado una reducción de hasta un 50 % en el índice de trabajo [Kingman, 2000; Lester, 2004]. Estos estudios mostraron que la reducción en el índice de trabajo aumenta cuanto más bajo sea el rango y más humedad esté presente en el carbón. El agua ocluida en el carbón mineral es el principal absorbente de la radiación microondas. No obstante, otros compuestos presentes en la materia mineral de los carbones como, por ejemplo, la pirita también absorben radiación microondas. Así, la evaporación del agua y la expansión de la pirita provocan la fractura de las piezas de carbón que posteriormente facilitarán su molienda [Lester, 2004; Lester, 2005; Marland, 1998; Marland,

2000]. Es por ello que para carbones de muy alto rango, como la antracita, que tienen menos humedad y una estructura más ordenada, se han encontrado mejoras en la molienda de “sólo” un 10 %. No obstante, el método de calentamiento utilizado en ese estudio difiere, como se verá más adelante, del realizado en el presente trabajo (i.e., un único pulso de gran intensidad vs. pulsos cortos de baja potencia) [Lester, 2005].

También se demostró que cuando mayor sea la temperatura de Curie<sup>9</sup> el material se calentará mejor. Además, como ocurre con la fluencia, un tamaño de grano mayor favorece el calentamiento al presentar mayor área superficial por la cual se concentre las tensiones provocadas por el estrés térmico [Noboru Yoshikawa, Etsuko Ishizuka y Shoji Taniguchi, 2006].

## b. Tipo de calentamiento.

Dentro de los materiales dieléctricos, no todos se calientan en igual medida bajo las mismas condiciones de calentamiento bajo microondas. La cantidad de energía de microondas absorbida por un material depende de varios factores, como el tamaño de la muestra, su orientación respecto a las ondas y sus propiedades térmicas y dieléctricas [Thostenson, 1999; Zhang, 2006]. De especial importancia son estas últimas, ya que definen la capacidad del material dieléctrico para disipar en forma de calor la energía de microondas previamente absorbida, el factor de pérdida del material [Haque, 1999].

Bajo la radiación con microondas, existen dos mecanismos de calentamiento principales [Will, 2004; Zlotorzynski, 1995]. Se vuelve a hacer referencia:

- **Polarización dipolar:** Ocurre en los materiales dieléctricos con dipolos permanentes, que tienden a reorientarse debido a los rápidos cambios de polaridad del campo electromagnético aplicado. Los dipolos normalmente orientados al azar, se alinean empujados por el campo eléctrico. Cuando éste se relaja, los dipolos se reorientan al azar para alinearse de nuevo cuando la intensidad de campo aumenta y adquiere la polaridad opuesta. Este movimiento, que ocurre millones de veces por segundo, genera fricción dentro del dieléctrico y la energía se disipa en forma de calor [Jones, 2002]. Este fenómeno está también relacionado con el tiempo de relajación.

---

<sup>9</sup> Temperatura a partir de la cual un material magnético pierde su capacidad magnética.

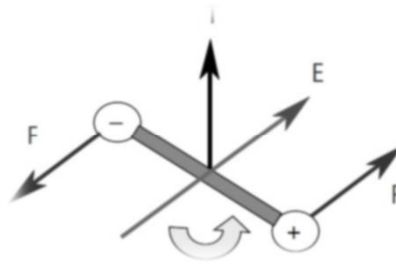


Ilustración 38. Movimiento bipolar.

- Polarización por carga del espacio:** Se manifiesta en materiales que contienen cargas libres (por ej., electrones o iones) cuyo desplazamiento, motivado por la influencia del campo electromagnético, está restringido por los límites de partícula. De esta manera, regiones macroscópicas se convierten en positivas o negativas, y el calentamiento se produce a causa de las resistencias eléctricas dentro del propio material. Este mecanismo es conocido como el efecto Maxwell-Wagner.

En la siguiente imagen se muestra la interacción de la onda en función de su longitud de onda con el material.

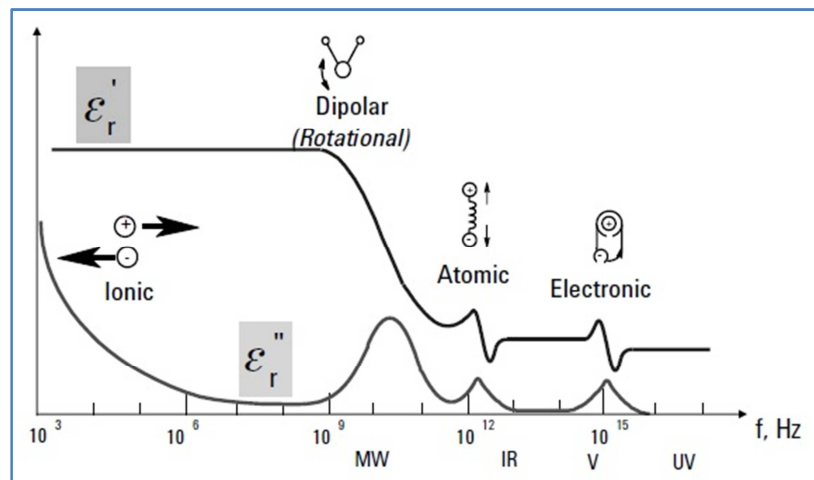


Ilustración 39- Clases de calentamiento en función de la frecuencia.

Esta energía de microondas se transfiere electromagnéticamente y se disipa dentro del material dieléctrico más o menos uniformemente, al contrario que en el calentamiento convencional, donde la transferencia de calor se realiza desde la superficie hacia el interior, principalmente por conducción. Debido a esto, los perfiles de temperatura en una muestra son diferentes en función del tipo de calentamiento empleado. En general, la temperatura dentro de un material calentado convencionalmente es inferior a la de su superficie, mientras que, en el caso del calentamiento con microondas, el material se encuentra a mayor temperatura que la atmósfera circundante.

Así, el gradiente de temperaturas puede existir, aunque en menor extensión, y siempre con el interior más caliente que la superficie.

### I. Ventajas del calentamiento por microondas:

Por consiguiente, el calentamiento en microondas de un material dieléctrico ofrece múltiples ventajas sobre el calentamiento convencional [Menéndez, 2010; Standish, 1991]:

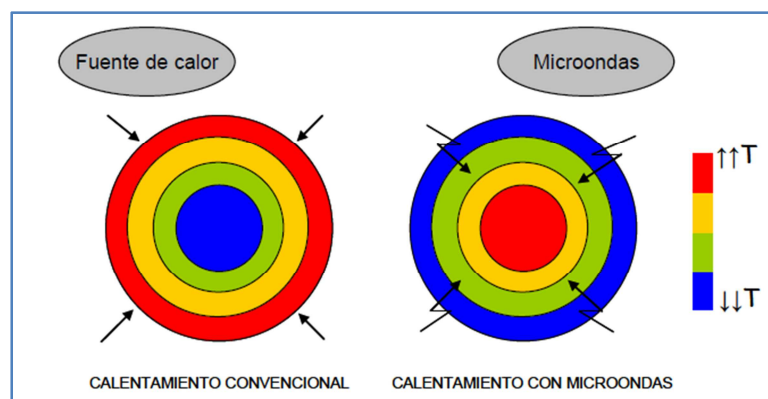
- Calentamiento sin contacto.
- Transferencia de energía en lugar de transmisión de calor.
- Calentamiento rápido.
- Calentamiento selectivo del material.
- Rápido arranque y parada.
- Alto nivel de seguridad y automatización.

#### Calentamiento convencional.

Se necesita contacto entre mineral y fuente de calor. El calor se propaga desde la superficie al interior, calentamiento poco homogéneo.

#### Calentamiento por microondas.

Sin contacto fuente de calor mineral. La onda penetra y por las propiedades dieléctricas del mineral absorbe la onda y se calienta. Calentamiento homogéneo.



**Ilustración 40. Comparativa calentamientos.**

Gracias a estas ventajas, las microondas se utilizan en diversos campos científicos y tecnológicos para calentar diferentes materiales. La mayoría de las aplicaciones industriales del calentamiento con microondas (industria alimentaria, esterilización y pasteurización, procesos de secado, vulcanizado del caucho, polimerización o curado de resinas y polímeros por



eliminación de disolventes polares, etc.) se basan en el calentamiento de sustancias que contienen moléculas polares. Pero también otros materiales se pueden someter a procesos basados en el calentamiento con microondas.

## II. Inconvenientes del calentamiento por microondas.

La principal desventaja del uso de microondas es la falta de información de las propiedades dieléctricas de los distintos materiales en ciertas condiciones.

No hay un patrón común más que el de las propiedades dieléctricas y éstas varían en función de sus propiedades físicas y químicas. Es decir, por ejemplo póngase una mena de un mineral de hierro; según su procedencia un mineral puede tener un contenido mayor o menor en un elemento cambiando sus propiedades respecto a un mismo material procedente de otra mina.

Los principales condicionantes de la variación de las propiedades dieléctricas son:

- Contenido en agua.
- Estructura molecular.
- Área superficial.
- Volumen.
- Porosidad.

No sólo el material influye en las propiedades dieléctricas, el tipo de microondas también les afecta. Estas son las principales:

- Frecuencia de onda.
- Temperatura.
- Orientación y distribución de la onda.

Esto complica la elección del tratamiento adecuado para obtener un calentamiento óptimo. A lo largo de los años se han realizado varios experimentos que se expondrán a continuación sobre los principales minerales de hierro y el coque.

Otro problema que aparece es el fenómeno de los “hot spots”, ya comentado. Estos puntos calientes aparecen cuando algunas partes internas del material están sobrecalentadas, es decir, no se produce un calentamiento homogéneo del material. Esto aparece si la energía absorbida por el material es superior y no sigue un comportamiento lineal con la temperatura.

La temperatura que pueden alcanzar estos “hotspots” puede ser tan elevada como para derretir los materiales, que obviamente no es algo asumible.

Por último, hay una frontera límite en el uso de microondas. Los costes energéticos pueden generar pérdidas elevadas y hacer el proceso no rentable. Este punto genera controversia ya que no se sabe donde está el límite con exactitud.

### **c. Tiempos de tratamiento.**

Como ya se comentó previamente, en lo que respecta a la forma de aplicación de las microondas, se observó que el tiempo total de irradiación al que se someten las muestras y el modo en que se aplica este tiempo son factores que determinan el calentamiento y por consiguiente la cantidad de finos obtenidos en la molienda posterior. Los tiempos de irradiación estudiados dependen del estudio pero comprenden valores que van de los segundos a los minutos [Walkiewicz, 1988]

El tipo y la clase de irradiación es otro factor importante, se puede aplicar la onda de una manera constante o racionándola en distintos intervalos de tiempo con una margen entre descarga y carga. Este último método resulto mucho más eficaz tanto desde el punto de vista económico y del calentamiento experimentado

Normalmente todo material tiene un tope máximo de irradiación, es decir, una temperatura máxima que no se ha de superar, debido a este riesgo es porque es recomendable el tratamiento por ciclos para que el material ensayado tenga tiempo a reposar.

Dichos autores emplean tiempos de calentamiento inferiores a un segundo pero suministran cantidades de energía muy altas, difiriendo de los experimentos realizados en este estudio donde se suministró menos energía durante periodos más largos de tiempo.

### **d. Experimentación:**

La energía de microondas se intenta distribuir de manera homogénea en todas las muestras por lo que es sometida a un giro con una velocidad angular constante. La muestra se calentará más rápidamente que el exterior debido a la permisividad térmica. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, un horno de microondas se coloca alrededor de la de la muestra para evitar gradientes térmicos debido a la pérdida de calor en la superficie de la muestra.

#### **I. Mineral de hierro.**

El objetivo de los ensayos realizados es reducir los costes de la molienda de materiales siderúrgicos, concretamente minerales de hierro y coque. La idea es someterles a un estrés termomecánico con el uso de microondas, creando fisuras en las juntas de grano facilitando la molienda.

Como se había comentado anteriormente los materiales se comportan de forma distinta cuando son sometidos a un campo electromagnético. Estas diferencias se pueden atribuir a la diferencia entre el factor de pérdida dieléctrico y la conductividad eléctrica y por último la estructura y el tipo de unión.

Se observó que hay minerales que se calientan más fácilmente que otros, sin embargo, lo más importante no es la temperatura alcanzada si no el tipo de calentamiento. Es recomendable un calentamiento rápido (alta frecuencias) para producir un estrés térmico mayor y debilitar al material de una forma más eficaz.

También se observó que en algunos minerales interesa tener una ganga transparente al microondas.

Varios estudios realizaron con distintos materiales y condiciones fueran realizados en distintos lugares del mundo. A continuación se mostrarán los principales resultados en minerales de hierro y coque para poder llegar a una conclusión.

La siguiente tabla muestra el calentamiento de una serie de minerales noruegos durante 30 segundos a *\*solo se muestran los minerales de hierro el resto no han sido incluidos.*

**Tabla 9. Ensayo calentamiento 1.**

MINERAL	POTENCIA	CALENTAMIENTO
<b>Pirita</b>	30W	Calentamiento hiperactivo
<b>Hematita</b>	50W	Calentamiento activo
<b>Magnetita</b>	30W	Calentamiento hiperactivo

Otro ensayo dio la siguiente tabla:

**Tabla 10. Ensayo calentamiento 2.**

MINERAL	POTENCIA	FRECUENCIA	TIEMPO	RATIOS TEMPERATURA	CLASE CALENTAMIENTO
<b>Pirita</b>	500W	2.45GHz	4 minutos	20 (°C/s)	500°C 1000 °C
<b>Hematita</b>	500W	2.45GHz	4 minutos	170 (°C/min)	1000 °C
<b>Magnetita</b>	500W	2.45GHz	4 minutos	20 (°C/s)	500 °C

Las fracturas observadas a microscopio después del tratamiento son debidas a las distintas tasas de expansión de los minerales. Algunos ejemplos de materiales altamente absorbentes son los óxidos metálicos, carbones, minerales sulfurosos.....

En cambio los estudios realizados concluyeron que los materiales transparentes son las gangas, silicatos, carbonatos y algunos óxidos y sulfuros metálicos (no de hierro). Más adelante se profundizó en el efecto del microondas sometiendo a más materiales.

Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

Los minerales fueron introducidos en un horno microondas con una frecuencia de 2.45 GHz y una potencia de 1KW. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 11. Ensayo calentamiento 3.**

MINERAL	TEMPERATURA MÁXIMA	FRECUENCIA	POTENCIA	TIEMPO (min)
<b>Pirita</b>	1019 <sup>0</sup> C	2.45GHz	1000W	6.75
<b>Hematita</b>	182 <sup>0</sup> C	2.45GHz	1000W	7
<b>Magnetita</b>	1258 <sup>0</sup> C	2.45GHz	1000W	2.75

Un último experimento se llevó a cabo: Las condiciones son las expuestas en la tabla con materiales de 3 cm de diámetro.

El ensayo se centró en resolver 2 problemas:

1. El problema de propagación de la onda.
2. El problema de transferencia de calor.

Los minerales ensayados tenían una masa de 20 g con un tamaño de partícula de 0.2 - 0.5 mm. Las muestras fueron irradiadas en un horno microondas doméstico Whirpool AVM 434 con la salida de 900 W y a la frecuencia de 2,45 GHz.

**Tabla 12. Ensayo calentamiento 4.**

MINERAL	POTENCIA	FRECUENCIA	TEMPERATURA ALCANZADA	
			1 min	5 min
<b>Pirita</b>	900W	2.45GHz	670 <sup>0</sup> C	
<b>Hematita</b>	900W	2.45GHz	118 <sup>0</sup> C	423 <sup>0</sup> C
<b>Magnetita</b>	900W	2.45GHz	547 <sup>0</sup> C	
<b>Siderita</b>	900W	2.45GHz	152 <sup>0</sup> C	227 <sup>0</sup> C

Como ya se había adelantado, de las tablas se observa que la potencia es un factor secundario, la frecuencia y el tiempo de exposición son parámetros mucho más importantes para un rápido incremento de temperatura (si bien hay que tener en cuenta el fenómeno de los “hotpots”). Se observa que la pirita y la magnetita tienen unos ratios de temperatura muy superiores a la hematita. Aunque ésta tiene un tope de temperatura mayor que las anteriores. También se ha de tener en cuenta que la temperatura alcanza un tope máximo con el tiempo y que el calentamiento se ralentiza según nos movemos en mayores temperaturas.

## II. Coque.

Entre los materiales, los materiales de carbono son, generalmente, muy buenos absorbentes de microondas [Menéndez, 2010], por lo que se pueden producir y transformar fácilmente por calentamiento con microondas. Además se pueden utilizar como receptores de microondas para calentar indirectamente materiales transparentes a los mismos, por lo que se han utilizado como receptores de microondas en procesos de remediación del suelo, pirólisis de biomasa y residuos orgánicos, reacciones catalíticas heterogéneas, etc.

En el caso de algunos carbones, como el coque, en los que los electrones están deslocalizados tienen libertad de movimiento en regiones relativamente amplias, puede tener lugar un interesante fenómeno [Fitzer, 1995; Menéndez, 2010]. La energía cinética de algunos electrones puede llegar a ser suficiente para que estos salten fuera del material provocando la ionización de la atmósfera de su alrededor. A nivel macroscópico, este fenómeno se percibe por la formación de chispas o arcos eléctricos [Menéndez, 2011]. Pero, a nivel microscópico, estos puntos calientes son plasmas, que en la mayoría de las ocasiones pueden considerarse micro-plasmas tanto desde el punto de vista del tiempo como del espacio, ya que tienen lugar en una minúscula región del espacio y durante una fracción de segundo. Una generación intensa de tales micro-plasmas puede tener importantes implicaciones para los procesos involucrados aunque no será estudiado en el presente trabajo fin de master.

**Tabla 13. Ensayo calentamiento 5.**

TIPO DE MINERAL	RATIOS DE TEMPERATURAS	TEMPERATURA MÁXIMA	CLASE DE CALENTAMIENTO.
Carbón coq	100 (°C/s)	1000°C	Hiperactivo

## 7. CONCLUSIONES:

Tras estudiar las propiedades dieléctricas y sus mecanismos internos quedó demostrado que todos los materiales tienen propiedades dieléctricas, sin embargo, no todos son aptos para un calentamiento bajo irradiación de microondas.

Estas propiedades dieléctricas, como la permeabilidad, varían en función de las propiedades micro-estructurales, físicas y químicas del material, y del tipo de onda electromagnética con que es irradiado; razón porque las mediciones son tan variables. Para ayudar a fijar esos valores siempre tienen que estar referenciados en al menos dos de estas variables.

Los sistemas de medida presentan una técnica complicada centrándose más en la frecuencia, clases de pérdidas y otra vez en la temperatura de los materiales al ser irradiados. Otras constantes son eliminadas por la propia naturaleza de los ensayos, por eso, no es normal encontrar referencias al contenido de impurezas, humedad, etc. Sin embargo, es sabido que influyen en las propiedades dieléctricas.

Respecto al calentamiento se demostró que es producido por la vibración de las moléculas bipolares al intentar alinearse con el campo o por la migración de cargas. Un valor elevado de la constante dieléctrica y del factor de pérdida son condiciones para un calentamiento eficaz bajo microondas.

Además la temperatura, un tamaño de grano grande, un elevado contenido en agua, ciclos de irradiación cortos y energéticos, y una correcta distribución de la onda resultan beneficiosos para el calentamiento.

Por último, tanto los minerales de hierro como el coque metalúrgico son aptos para este tratamiento.

## 8. ANEXOS:

Lista de las propiedades dieléctricas de los materiales con la temperatura medida en °F y el estado de la materia (datos en inglés):

MEDIA	Dc	TEM P F	STAT E
ABS ( PLASTIC)	1.9	72	GR
ABS RESIN	2.4	75	P
ACENAPHTHENE	3	70	L
ACETAL	3.6	70	L
ACETAL DOXIME	3.4	68	L
ACETALDEHYDE	22. 2	50	L
ACETALDEHYDE	21. 8	41	L
ACETALDEHYDE OXIME	3	73.4	L
ACETAMIDE	4.1	60	L
ACETAMIDE	4	75	S
ACETANILIDE	2.9	71	L
ACETANILIDE	2.9	75	S
ACETATE	1.3	75	GR
ACETIC ACID	6.2	68	L
ACETIC ACID	4.1	36	S
ACETIC ACID	6.6	160	L
ACETIC ANHYDRIDE	20	68	L
ACETONE	20. 7	77	L
ACETONE	17. 7	127	L
ACETONE	21. 4	71	L
ACETONE	18. 7	122	L
ACETONE (1.0159)	1	32	GA
ACETONITRILE	38. 8	68	L
ACETONITRILE	37. 5	70	L
ACETOPHENONE	18. 3	68	L
ACETOPHENONE	17. 3	75	L
ACETOXIME	3	75	L
ACETYL ACETONE	23. 1	68	L
ACETYL BROMIDE	16. 5	68	L
ACETYL CHLORIDE	15. 8	68	L
ACETYLENE (1.0217)	1	32	GA

ACETYLMETHLY HEXYL KETONE	27. 9	66	L
ACRYLIC (PLASTIC)	1.9	75	GR
ACRYLIC RESIN	2.7	75	P
AEROSIL (1.044)(INSULATION)	1	75	GR
AIR (DRY) (1.0005)	1	68	GA
ALCOX 600	4.1	130	L
ALIPHATIC AMINE	7.2	195	L
ALKYD	3.2	75	L
ALLYL ALCOHOL	21	70	L
ALLYL ALCOHOL	22	58	L
ALLYL BROMIDE	7	66	L
ALLYL CHLORIDE	8.2	68	L
ALLYL IODIDE	6.1	66	L
ALLYL ISOTHIOCYANATE	17. 5	64	L
ALLYL RESIN (CAST)	3.6	75	S
ALUMINA	4.5	75	S
ALUMINA	2.5	75	GR
ALUMINA HYDRATE	11. 5	75	S
ALUMINUM BROMIDE	3.4	212	L
ALUMINUM CHLORIDE	2.7	75	L
ALUMINUM DIOXIDE	2.2	75	L
ALUMINUM HYDROXIDE	5.4	75	S
ALUMINUM OLEATE	2.4	68	L
ALUMINUM OXIDE	2	75	GR
ALUMINUM PHOSPHATE	6.1	75	S
ALUMINUM THIOCYANATE	2.6	75	GR
ALUMINUM TRICHLORIDE	5.3	75	S
AMHYDRITE	3.4	75	GR
AMINOX	2.4	275	L
AML MERCAPTAN	4.7	68	L
AMLY ACETATE	5	68	L
AMLY ALCOHOL	35. 5	-180	L
AMLY ALCOHOL	11. 2	140	L
AMLY BENZOATE	5.1	68	L
AMLY BROMIDE	6.3	50	L
AMLY CHLORIDE	6.6	52	L
AMLY ETHER	3.1	60	L
AMLY FORMATE	5.7	66	L
AMLY IODIDE	6.9	62	L

AMLY NITRATE	9.1	62	L
AMLY THIOCYANATE	17.4	69	L
AMMONIA	25	-104	L
AMMONIA	22.4	-27	L
AMMONIA	4.1	75	L
AMMONIA	22	-30	L
AMMONIA	15.5	68	L
AMMONIA	16.9	76	L
AMMONIA (1.0072)	1	32	GA
AMMONIUM BROMIDE	7.1	75	S
AMMONIUM CHLORIDE	7	75	S
AMONIA PRODUCT	18.9	40	L
AMPS PRODUCT	1.7	75	GR
AMYL ACETATE	5	68	L
AMYL ALCOHOL	35.5	-180	L
AMYL ALCOHOL	11.2	140	L
AMYL ALCOHOL	15.8	68	L
AMYL BENZOATE	5.1	68	L
AMYL BROMIDE	6.3	50	L
AMYL CHLORIDE	6.6	52	L
AMYL ETHER	3.1	60	L
AMYL FORMATE	5.7	66	L
AMYL IODIDE	6.9	62	L
AMYL NITRATE	9.1	62	L
AMYL THIOCYANATE	17.4	68	L
AMYLAMINE	4.6	72	L
AMYLENE	2	70	L
AMYLENE BROMIDE	5.6	58	L
AMYLMERCAPTAN	4.7	75	L
ANHYDRITE	4.9	75	S
ANILINE	7.8	32	L
ANILINE	5.5	212	L
ANILINE	7.3	68	L
ANILINE FORMALDEHYDE RESIN	3.5	75	P
ANISALDEHYDE	15.8	68	L
ANISALDOXINE	9.2	145	L
ANISOLE	4.3	68	L
ANTIMONY	13.9	347	L
ANTIMONY PENTACHLORIDE	3.2	68	L
ANTIMONY TRIBROMIDE	20.	212	L

	9		
ANTIMONY TRICHLORIDE	33	166	L
ANTIMONY TRICODIDE	13.9	347	L
ANTIMONY TRIIODIDE	13	350	L
APATITE	7.4	75	S
ARGON, LIQUIFIED	1.5	-376	L
ARSENIC	2.2	75	GR
ARSENIC TRIBROMIDE	9	98	L
ARSENIC TRICHLORIDE	12.4	70	L
ARSENIC TRIIODIDE	7	302	L
ARSINE	2.7	-58	L
ARSINE	2.5	-148	L
ASBESTOS	4.8	75	S
ASH, CEMENT KILN	12.5	75	GR
ASH, FLY (BOILER)	1.7	125	P
ASH, FLY (BOILER)	1.9	80	P
ASH, SODA	3.6	75	GR
ASH, SODA	1.6	75	GR
ASH, SODA (0.09% H2O)	1.7	75	GR
ASPHALT	2.6	75	S
ASPHALT	3.7	400	L
ATTREX 80 PRODUCT	1.7	75	GR
AZOXYANISOLE	2.3	122	L
AZOXYBENZENE	5.1	104	L
AZOXYPHENITOLE	6.8	302	L
BAKELITE PLASTIC	5	75	S
BAKING SODA	1.8	80	P
BALL MILL FEED TO 1" DIA	2.6	75	S
BALL MILL FEED, HI DENSITY	4.5	75	S
BARET STRANDS	1.8	75	GR
BARIUM CHLORIDE (2 H2O)	9.4	75	S
BARIUM CHLORIDE (ANHYDROUS)	11.4	75	S
BARIUM NITRATE	5.9	75	S
BARIUM SULFATE	11.4	60	S
BARLEY MALT	2.6	75	GR
BARLITE ORE	2.7	75	P
BAUXITE	3	75	GR
BAY FERROX	1.9	75	GR
BENTONITE	7.5	75	S
BENZAL CHLORIDE	6.9	75	L
BENZALDEHYDE	17	68	L
BENZALDEHYDE	19	32	L
BENZALDOXIME	3.8	68	L
BENZENE	2.3	77	L
BENZENE	2.1	275	L



BENZENE (1.0028)	1	700	GA
BENZIL	13	202	L
BENZINE	7.6	75	L
BENZOL CHLORIDE	6.9	68	L
BENZOLDEHYDE	17.8	68	L
BENZONITRILE	22	160	L
BENZONITRILE	26	68	L
BENZOPHENONE	11.4	122	L
BENZOPHENONE	13	68	L
BENZOTRICHLORIDE	7.4	68	L
BENZOYL CHLORIDE	23	32	L
BENZOYL CHLORIDE	19	75	L
BENZOYLACETONE	3.8	68	L
BENZYL ACETATE	5	70	L
BENZYL ALCOHOL	13	68	L
BENZYL ALCOHOL	6.6	260	L
BENZYL BENZOATE	4.8	68	L
BENZYL CHLORIDE	6.4	68	L
BENZYL CYANIDE	18.3	68	L
BENZYL SALICYLATE	4.1	68	L
BENZYLAMINE	5.5	32	L
BENZYLAMINE	4.3	120	L
BENZYLAMINE	4.6	68	L
BENZYLETHYLAMINE	4.3	68	L
BENZYLMETHYLAMINE	4.4	67	L
BENZYLAMINE	4.6	68	L
BERYL	6	75	S
BISPHENOL	1.9	75	P
BITUMEN FROTH	4.1	75	L
BORIC ACID	11.8	75	P
BORNYL ACETATE	4.6	70	L
BORON BROMIDE	2.6	32	L
BORONYL CHLORIDE	5.2	202	L
BPA (PLASTIC RESIN)	1.3	75	P
BRAN, WHEAT	1.5	75	GR
BROMAL	7.6	70	L
BROMAO-2-ETHOXYPENTANE	6.4	76	L
BROMINE	3.1	68	L
BROMINE (1.0128)	1	32	GA
BROMO-2-ETHOXYHEPTANE	5.5	68	L
BROMO-2-ETHOXYHEPTANE	6.4	32	L
BROMOACETYL BROMIDE	12.6	68	L
BROMOANILINE	13	66	L
BROMOANILINE, (-M)	13	66	L
BROMOANISOLE	7.1	86	L

BROMOBENZENE	5.4	68	L
BROMOBUTANE	7.1	68	L
BROMOBUTYLENE	5.8	68	L
BROMOBUTYRIC ACID	7.2	68	L
BROMOCYCLOHEXANE	7.9	70	L
BROMODECANE	4.4	76	L
BROMODOCOSANE	3.1	130	L
BROMODODECANE	4.1	76	L
BROMOETHANE	9.4	68	L
BROMOFORM	4.4	68	L
BROMOHEPTANE	5.3	76	L
BROMOHEXADECANE	3.7	76	L
BROMOHEXANE	5.8	76	L
BROMOISOVALERIC ACID	6.5	68	L
BROMOMETHANE	9.8	32	L
BROMOMETHYL BUTANE	6	68	L
BROMOMETHYLPROPANE	7.2	68	L
BROMONAPHTHALENE	5.1	66	L
BROMONONANE	4.7	68	L
BROMOOCTADECANE	3.5	86	L
BROMOOCTANE	5	70	L
BROMOPENTADECANE	3.9	68	L
BROMOPENTANE	6.3	75	L
BROMOPROPANE	8.1	75	L
BROMOPROPENE	7	68	L
BROMOPROPIONIC ACID	11	68	L
BROMOTETRADECANE	3.8	75	L
BROMOTOLUENE	5.1	68	L
BROMOTOLUENE	4.3	137	L
BROMOTOLUENE, (-M)	5.4	137	L
BROMOTRIDEDECANE	4.2	50	L
BROMOUNDECANE	4.7	15	L
BTF PRODUCT	6.1	75	L
BUTANE	1.4	30	L
BUTANEDIOL	30	80	L
BUTANEDIOL DINITRATE	18	68	L
BUTANETHIOL	5	75	L
BUTANOL	17.8	68	L
BUTANOL	15.8	75	L
BUTANONE	18.5	68	L
BUTANONE OXIME	3.4	68	L
BUTOXYACETYLENE	6.6	75	L
BUTYL ALCOHOL (150-)	20	75	L
BUTYL ALCOHOL (N-)	7.8	75	L
BUTYL BROMIDE (-N)	6.6	68	L
BUTYL CHLORAL	10	64	L
BUTYL CHLORIDE	9.6	68	L

BUTYL ETHER	3.1	75	L
BUTYL FORMAT (-N)	2.4	-317	L
BUTYL IODIDE (-N)	6.1	77	L
BUTYL OLEATE	4	77	L
BUTYL STEARATE	3.1	80	L
BUTYLACETATE	5.1	66	L
BUTYLACETATE (-N)	5.1	66	L
BUTYLAMINE	5.4	70	L
BUTYLBENZENE	2.4	68	L
BUTYLPHENOL PORA-TERTIARY	3.9	100	L
BUTYRALDEHYDE	13.4	79	L
BUTYRIC ACID	2.8	68	L
BUTYRIC ANHYDRIDE	12	68	L
BUTYRONITRILE	20.7	70	L
CABOSIL	1.2	75	GR
CADMIUM OXIDE	1.6	75	GR
CALCITE	8	75	S
CALCIUM CARBONATE	9.1	75	S
CALCIUM CARBONATE	2.4	75	GR
CALCIUM FLORIDE	7.4	75	S
CALCIUM SILICATE	11.2	75	S
CALCIUM SULFATE	5.6	75	S
CALCIUM SULFATE	2.3	75	P
CALCIUM UNDECYLENATE	1.3	75	GR
CAMPHANEDIONE	16	398	L
CAMPHENE	2.3	104	L
CAMPHENE	2.7	68	L
CAMPHORIC IMIDE	5.5	480	L
CAMPHORPINACONE	3.6	68	L
CANDY ( REESE'S PIECES)	2.1	75	GR
CAPROIC ACID	2.6	160	L
CAPROLACTAM MONOMER	1.7	75	P
CAPROLACTUM	13.1	180	L
CAPRYLIC ACID	3.2	65	L
CARBON BLACK	2.5	75	P
CARBON DIOXIDE (PRESSURIZED)	1.6	32	L
CARBON DIOXIDE (9PRESSURIZED)	1.6	68	L
CARBON DISULPHID	2.2	350	L
CARBON DISULPHID	3	-166	L
CARBON DISULPHIDE	2.2	180	L
CARBON DISUPHIDE	2.6	68	L
CARBON TETRACHLORIDE	2.2	68	L
CARVENONE	18.4	68	L
CARVOL	11.	64	L

	2		
CARVONE	11	71	L
CASEIN	6.1	75	L
CASSITERITE	23.4	75	S
CEDRENE	3.7	76	L
CELLULOSE (FROM WOOD)	3.9	75	S
CELLULOSE ACETATE	3.6	75	S
CELLULOSE ACETATE (MOLDING)	3.2	75	S
CELLULOSE ACETATE (SHEET)	4	75	S
CELLULOSE CETATE BUTYRATE	3.2	75	S
CELLULOSE NITRAE (PROXYLIN)	6.4	75	S
CEMENT-PLASTIC TYPE	1.9	140	P
CEMENT-PORTLAND	2.3	140	P
CEREAL (FLAKE)	3	75	GR
CEREAL (FRUIT LOOPS)	1.2	75	GR
CETYL IODIDE	3.3	68	L
CHARCOAL (GROUND)	1.2	75	GR
CHARCOAL (LUMP)	1.6	75	P
CHLOPAL	5.5	59	L
CHLORACETIC ACID	12.3	140	L
CHLORAL	4.9	68	L
CHLORAL	5.5	59	L
CHLORAL	4.2	140	L
CHLORINATED SANITIZER	4.8	75	L
CHLORINE	2	32	L
CHLORINE	1.5	142	L
CHLORINE	2.1	-58	L
CHLORINE	1.9	58	L
CHLORO-A, DIHYDROXYPRONE	31	68	L
CHLOROACETIC ACID	21	68	L
CHLOROACETONE	29.8	68	L
CHLOROANALINE, (-M)	13.4	66	L
CHLOROBENZENE	5.9	68	L
CHLOROBENZENE	4.7	212	L
CHLOROBENZENE	7.2	-50	L
CHLOROBENZENE	5.6	77	L
CHLOROBENZENE	4.1	230	L
CHLOROBUTANE	9.1	-20	L
CHLOROBUTANE	7.4	68	L
CHLOROCYCLOHEXANE	7.6	76	L
CHLORODODECANE	3.9	100	L
CHLORODODECANE	4.2	75	L
CHLOROETHANE	6.2	340	L

CHLOROFORM	5.5	32	L
CHLOROFORM	3.7	212	L
CHLOROFORM	4.8	68	L
CHLOROGANILINE	13	65	L
CHLOROHEPTANE	5.5	71	L
CHLOROHEXANONE OXIME	3	192	L
CHLOROHYDRATE	3.3	68	S
CHLOROMETHANE	12. 6	-35	L
CHLOROMETHYL BUTANE	6.1	65	L
CHLOROMETHYLPROPANE	6.5	45	L
CHLORONAPHTHALENE	5	76	L
CHLORONITROBENZENE	8	230	L
CHLORO OCTANE	5.1	76	L
CHLORO-OCTANE	5.1	76	L
CHLOROPENTANE	6.6	50	L
CHLOROPHENAL	6.3	75	L
CHLOROPHENAL	4.8	32	L
CHLOROPHENOL	9.5	130	L
CHLOROPHENOL (-O)	8.2	66	L
CHLOROPHETANE	5.4	75	L
CHLOROTOLUENE	4.5	68	L
CHLOROTOLUENE, (-M)	5.6	68	L
CHLROINE	1.5	287	L
CHOCOLATE	2.3	75	S
CHOLESTRAL	2.9	80	L
CHORINE	1.7	170	L
CHROMYL CHLORIDE	2.6	68	L
CINNAMALDEHYDE	16. 9	75	L
CIS-3-HEXANE	2.1	76	L
CITRACONIC ANHYDRIDE	40. 3	68	L
CLAY	2.5	25	GR
CLAY	7.4	25	S
CLINKER, CEMENT TO 1" DIA	2.7	75	S
CLINKER, CEMENT, PEA	3.8	75	GR
COAL BITUMINOUS 0% H2O	4.1	400	P
COAL BITUMINOUS 0% H2O	3.2	700	P
COAL BITUMINOUS-0% H2O	7.5	77	P
COCAINE	3.1	75	S
COCOA	1.8	75	GR
COCOA BEANS	2.4	75	S
COFFEE "HIGH POINT"	1.5	75	GR
COFFEE BEANS (ROASTED)	4.4	75	S
COFFEE SOLVENT FOR CAFFINE	6	75	L
COKE (FROM COAL)	1.6	75	P
COPPER CATALYST	6	75	P
COPPER OLEATE	2.8	68	L
COPRA (DRY, FROM	7.4	75	S

COCONUTS)			
CORDERITE	2.5	75	P
CORDERITE	4.5	75	S
CORN (GROUND)	2.5	75	GR
CORN COBS	1.8	75	GR
CORN COBS 2% H2O (CRUSHED)	2	75	GR
CORN STARCH	3.6	75	GR
CORN, DRY STORAGE	4.6	75	GR
CREOSOL	10. 6	62	L
CRESOL	5	75	L
CRESOL, (-M)	5	75	L
CROTONIC NITRICE	28	68	L
CROTONONITRILE	28	68	L
CUMALDEHYDE	11	59	L
CUMENE	2.4	68	L
CUMICALDEHYDE	10. 7	58	L
CUPRIC OLEATE	2.8	75	S
CUPRIC OXIDE	18. 1	60	S
CUPRIC SULFATE (5H2O)	7.8	75	S
CUPRIC SULFATE (ANHYD/5H2)	10. 3	75	S
CYANOACETIC ACID	33	40	L
CYANOETHYL ACETATE	19. 3	68	L
CYANOGEN	2.6	73	L
CYCLOHEXADIENE	2.6	-128	L
CYCLOHEXADIONE	4.4	170	L
CYCLOHEXANE	2	68	L
CYCLOHEXANECARBOXYLIC ACID	2.6	88	L
CYCLOHEXANEMETHANOL	8	180	L
CYCLOHEXANEMETHANOL	9.7	140	L
CYCLOHEXANOL	7.2	212	L
CYCLOHEXANOL	15	77	L
CYCLOHEXANOL	4.8	300	L
CYCLOHEXANONE	19	-40	L
CYCLOHEXANONE	18. 2	68	L
CYCLOHEXANONE OXIME	3	192	L
CYCLOHEXENE	2.2	75	L
CYCLOHEXENE	2.6	-187	L
CYCLOHEXLTRIFLUOROMET HANE	11	-120	L
CYCLOHEXYLAMINE	5.3	-5	L
CYCLOHEXYLPHENOL	4.4	260	L
CYCLOHEXYLPHENOL	4	130	L
CYCLOPENTANE	2	68	L
CYCLOPENTANOL	25	-40	L

CYCLOPENTANOL	18	68	L
CYCLOPENTANONE	16	-90	L
CYMENE	2.3	62	L
DECAHYDRONAPHTHALENE	2.2	68	L
DECAMETHYLCYCLOPENTASILOX	2.5	68	L
DECAMETHYLTETRASILOXANE	2.4	68	L
DECANE	2	68	L
DECANE	2.1	32	L
DECANE	1.8	340	L
DECANOL	8.1	68	L
DECYLENE (	2.7	62	L
DECYNE	2.2	68	L
DEUTERIUM (HEAVY HYDROGEN)	1.3	-454	S
DEUTERIUM OXIDE (HEAVY H2O)	78.3	76	L
DEVRIOL	13.8	200	L
DIACETOXYBUTANE	6.6	76	L
DIACETOXYBUTANE	5.1	120	L
DIACETOXPENTANE	5.2	75	L
DIALLYL SULFIDE	4.9	68	L
DIAMOND	5.5	77	S
DIATOMACEOUS	2.7	77	GR
DIATOMACEOUS EARTH,	4	77	GR
DIATOMITE	12.9	77	GR
DIBENZOFURAN	3	212	L
DIBENZYL SEBACATE	4.6	68	L
DIBENZYLAMINE	3.6	68	L
DIBROMOBENZENE	4.5	190	L
DIBROMOBENZENE	8.8	68	L
DIBROMOBUTANE	5.8	68	L
DIBROMOETHANE	4.8	75	L
DIBROMOETHANE	4.1	265	L
DIBROMOETHYLENE	2.9	32	L
DIBROMOETHYLENE	2.8	75	L
DIBROMOHEPTANE	5.1	76	L
DIBROMOHEPTANE	3.8	150	L
DIBROMOHEXANE	4.7	76	L
DIBROMOMETHANE	7.8	50	L
DIBROMOPENTANE	4.3	68	L
DIBROMOPENTANE	4.4	75	L
DIBROMOPROPANE	4.3	68	L
DIBROMOPROPL ALCOHOL	9.1	70	L
DIBUTYL PHTHALATE	6.4	86	L
DIBUTYL SEBACATE	4.5	86	L
DIBUTYL TARTRATE	9.4	109	L
DICAPHOR	3.7	75	L

DICHLGRANILINE	18.2	200	L
DICHLORACETIC ACID	7.8	140	L
DICHLORACETIC ACID	8.2	72	L
DICHLORACETONE	14	68	L
DICHLORACTIC ACID	10.7	68	L
DICHLORETHANE	5.6	75	L
DICHLOROENZENE	2.9	75	L
DICHLOROENZENE	2.4	127	L
DICHLOROENZENE, (-M)	5	77	L
DICHLOROBUTANE	8.9	75	L
DICHLOROETHANE	16.7	68	L
DICHLOROETHANE (1,2)	10.3	77	L
DICHLOROETHYLENE	4.6	62	L
DICHLOROETHYLENE	2.1	75	L
DICHLOROMETHANE	9.1	68	L
DICHLOROMETHYLPROPANE	8.7	-4	L
DICHLOROMETHYLPROPANE	14	-148	L
DICHLOROMETHYLPROPANE	7.2	68	L
DI-CHLOROPHENAL	4.8	75	L
DICHLOROPROPANE	8.9	75	L
DICHLOROPROPANOLNITRATE	13	68	L
DICHLOROPROPANONE	14	68	L
DICHLOROSTYRENE	2.6	76	L
DICHLOROTOLUENE	6.9	68	L
DICYCLOHEXYL ADIPATE	4.8	95	L
DICYCLOPENTADIENE	2.4	100	L
DIBENZYLAMINE	3.6	68	L
DIETHOXYETHANE	3.8	76	L
DIETHYL 1-MALATE	9.5	68	L
DIETHYL AZELATE	5.1	86	L
DIETHYL BENZALMALONATE	8	32	L
DIETHYL BENZALMALONATE	5.9	160	L
DIETHYL BENZALMALONATE	7.6	68	L
DIETHYL CARBONATE	2.8	68	L
DIETHYL DETONE	17.3	58	L
DIETHYL DISULFIDE	15.9	66	L
DIETHYL DL-MALATE	10.2	64	L
DIETHYL GLUTARATE	6.7	86	L
DIETHYL KETONE	17.3	58	L
DIETHYL MALONATE	7.9	70	L
DIETHYL MERCURY	2.3	72	L

DIETHYL OXALATE	8.2	70	L
DIETHYL OXALOACETATE	6.1	66	L
DIETHYL RACEMATE	4.5	68	L
DIETHYL SEBACATE	5	86	L
DIETHYL SUCCINATE	6.6	86	L
DIETHYL SUCCINOSUCCINATE	2.5	66	L
DIETHYL SULFIDE	7.2	68	L
DIETHYL SULFITE	15.9	68	L
DIETHYL TARTRATE	4.5	68	L
DIETHYL ZINC	2.5	68	L
DIETHYLAMINE	3.6	70	L
DIETHYLAMINE	3.7	68	L
DIETHYLANILINE	5.5	66	L
DIHYDROCARVONE	8.5	66	L
DIIMYLAMINE	2.5	64	L
DIIOAMYLENE	2.4	62	L
DIODOBENZENE	2.8	250	L
DIODOBENZENE	4.2	68	L
DIODOETHYLENE	3.1	180	L
DIODOMETHANE	5.3	76	L
DIISOAMYL	2	62	L
DIISOAMYLAMINE	2.5	60	L
DIISOBUTYLAMINE	2.7	71	L
DIMETHOXYBENZENE	4.5	73	L
DIMETHOXYETHANE	3.5	68	L
DIMETHOXYMETHANE	2.7	68	L
DIMETHYL ETHYL CARBINOL	11.7	68	L
DIMETHYL HEPTENE	2.6	68	L
DIMETHYL HEXENE	2.4	68	L
DIMETHYL MALONATE	10.4	68	L
DIMETHYL OXALATE	3	68	L
DIMETHYL PHTHALATE	8.5	73	L
DIMETHYL SUCCINATE	5.1	68	L
DIMETHYL SULFATE	55	68	L
DIMETHYL SULFIDE	6.3	68	L
DIMETHYL-1-HYDROXYBENZENE	4.8	62	L
DIMETHYL-2-BUTANONE	13.1	293	L
DIMETHYL-2-HEXANE	2.4	68	L
DIMETHYLAMINE	5.3	75	L
DIMETHYLAMINE	6.3	32	L
DIMETHYLANILINE	4.4	160	L
DIMETHYLANILINE	4.9	68	L
DIMETHYLBROMOETHYLENE	6.7	68	L
DIMETHYLBUTADIENE	2.1	75	L

DIMETHYLEYCLOHEXYLOMINE	4.4	180	L
DIMETHYLGUINOXALINE	2.3	76	L
DIMETHYLHEPTANE	1.9	68	L
DIMETHYLOCTANE	2	68	L
DIMETHYLPENTANE	1.9	68	L
DIMETHYLPYRAZINE	2.4	68	L
DIMETHYLQUINOXALINE	2.3	76	L
DIMETHYLTOLUIDINE	3.3	68	L
DINITRO BENZENE, (-M)	2.8	68	L
DINITROGEN OXIDE	2	-130	L
DINITROGEN OXIDE	1.6	32	L
DINITROGEN TETROXIDE	2.5	58	L
DIOCTYL PHTHALATE	5.1	76	L
DIOCTYL SEBACATE	4	78	L
DIOXANE	2.2	75	L
DIPALMITIN	3.5	161	L
DIPENTENE	2.3	68	L
DIPHEMYLETHANE	2.4	230	L
DIPHENYL	2.5	166	L
DIPHENYL ETHER	3.9	82	L
DIPHENYLAMINE	3.3	125	L
DIPHENYLETHANE	2.7	75	S
DIPHENYLETHANE	2.4	230	L
DIPHENYTMETHANE	2.6	62	L
DIPROPYL KETONE	12.6	62	L
DIPROPYLAMINE	2.9	70	L
DISTEARIN	3.3	172	L
DMT PRODUCT	1.6	75	L
DOCOSANE	2	122	L
DOCOSANOL	3	160	L
DODECAMETHYLCYCLOHEXISLOX	2.6	68	L
DODECAMETHYLPENTASILOXANE	2.5	68	L
DODECANE	2	68	L
DODECANE	2	14	L
DODECANE	1.8	410	L
DODECANOL	6.5	76	L
DODECYNE	2.2	76	L
DOLOMITE	6.8	75	S
DOWTHERM FLUID	3.4	70	L
DUST, FLUE (METALS MILL)	2	75	GR
DUST, FUME (SMELTER)	1.8	75	GR
DUST, FURNAACE (HEAT TREAT)	2.1	75	GR
EPICHLORIHYDRIN	22.7	68	L
EPON 100Z (RESIN) (CRYSTALS)	2.1	75	GR

EPON RESIN	13.3	75	L
EPOXY (CAST)	2	75	S
EPOXY RESIN	6.2	75	L
ERYTHRITOL	22	250	L
ETHANEDIAMINE	14.2	68	L
ETHANETHIOL	6.9	58	L
ETHANETHIOLIC ACID	13	68	L
ETHANOL	41	-76	L
ETHANOL	24.3	77	L
ETHYLENE CYANIDE	58.3	136	L
ETHLTOLUENE	2.2	76	L
ETHOXYACETYLENE	8.1	75	L
ETHOXYBENZENE	4.2	68	L
ETHOXYETHYL ACETATE	7.6	86	L
ETHOXYMETHYLBUTANE	4	68	L
ETHOXYNAPHTHALENE	3.3	66	L
ETHOXPENTANE	3.6	73	L
ETHOXYTOLUENE	3.9	68	L
ETHYL CELLULOSE	2.8	75	S
ETHYL 1-BROMBUTYRATE	8	68	L
ETHYL 2-IODOPROPIONATE	8.8	68	L
ETHYL ACETATE	6.4	68	L
ETHYL ACETATE	5.3	170	L
ETHYL ACETATE	6	75	L
ETHYL ACETOACETATE	15.9	71	L
ETHYL ACETONEOXALATE	16.1	66	L
ETHYL ACETOPHENONEOXALATE	3.3	66	L
ETHYL ACRYLATE	11.7	125	L
ETHYL ALCOHOL	24.3	77	L
ETHYL ALCOHOL	41	-76	L
ETHYL AMYL ETHER	4	68	L
ETHYL BENZENE	2.5	68	L
ETHYL BENZOATE	6	68	L
ETHYL BENZOYLACETATE	12.8	68	L
ETHYL BENZOYLACETOACETATE	8.6	70	L
ETHYL BENZYL ETHER	8.6	68	L
ETHYL BROMIDE	4.9	64	L
ETHYL BROMISOBUTYRATE	7.9	68	L
ETHYL BROMOPROPIONATE	9.4	68	L
ETHYL BROMOPROPIONATE	10	34	L
ETHYL BUTYRATE	5.1	68	L

ETHYL CARBONATE	3.1	68	L
ETHYL CHLORACETATE	11.6	68	L
ETHYL CHLOROCROTONATE	4.7	65	L
ETHYL CHLOROFORMATE	11.3	68	L
ETHYL CHLOROPROPIONATE	10.1	68	L
ETHYL CINNAMATE	5.3	66	L
ETHYL CROTONATE	5.4	68	L
ETHYL CYANOACETATE	27	68	L
ETHYL CYCLOBUTANE	2	68	L
ETHYL DICHOROACETATE	10	70	L
ETHYL DICHOROACETATE	11	34	L
ETHYL DODECANOATE	3.4	68	L
ETHYL ETHER	8.1	-148	L
ETHYL ETHER	4.3	68	L
ETHYL ETHER	5.7	-40	L
ETHYL ETHOXYBENZOATE	7.1	70	L
ETHYL FORMATE	8.4	66	L
ETHYL FORMYLPHENLACETATE	3	68	L
ETHYL FUMARATE	6.5	73	L
ETHYL HEPTENE	2.4	75	L
ETHYL HEXANOL	7.2	75	L
ETHYL HYDROXYMETHYLENEACE	7.8	70	L
ETHYL HYDROXYMETHYLENEMAL	6.6	72	L
ETHYL HYDROXYMETHYLENENPHE	5	68	L
ETHYL IODIDE	7.4	68	L
ETHYL ISOTHIOCYANATE	19.7	68	L
ETHYL LEVULINATE	12.1	70	L
ETHYL MALEATE	8.5	73	L
ETHYL MERCAPTAN	8	68	L
ETHYL NITRATE	19.7	68	L
ETHYL OLEATE	3.2	82	L
ETHYL OLEATE	2.6	300	L
ETHYL PALMITATE	3.2	68	L
ETHYL PHENYLACETATE	5.4	70	L
ETHYL PROPIONATE	5.7	68	L
ETHYL SALICYLATE	8.6	70	L
ETHYL SILICATE	4.1	68	L
ETHYL STEARATE	2.7	212	L
ETHYL STEARATE	3	104	L
ETHYL STEARATE	2.5	335	L
ETHYL SULFATE	29	68	L
ETHYL SULFIDE	5.2	120	L



ETHYL SULFIDE	5.7	75	L
ETHYL SULFITE	15	68	L
ETHYL SULFITE	17	32	L
ETHYL SULFITE	13	120	L
ETHYL THIOCYANATE	34	38	L
ETHYL THIOCYANATE	29	68	L
ETHYL TRICHLOROACETATE	7.8	68	L
ETHYL UNDECANOATE	3.6	68	L
ETHYL VALERATE	4.7	68	L
ETHYLAMINE	6.3	70	L
ETHYLANILINE	5.9	68	L
ETHYLBENZENE	3	76	L
ETHYLCYCLOPROPANE	1.9	75	L
ETHYLENE CHLORIDE	10. 5	68	L
ETHYLENE CHLOROHYDRIN	25	75	L
ETHYLENE CYANIDE	58. 3	136	L
ETHYLENE DIAMINE	16	64	L
ETHYLENE DICHLORIDE	11	75	L
ETHYLENE GLYCOL	37	68	L
ETHYLENE NITRATE	28	68	L
ETHYLENE OXIDE	14	25	L
ETHYLENE OXIDE	13. 9	30	L
ETHYLPENTANE	1.9	68	L
ETHYNYLBENZENE	3	76	L
ETIBINE	2.5	-58	L
EUGENOL	6.1	64	L
FATS, ANIMAL	2	75	L
FENCHONE	12	68	L
FERMANIUM TETRACHLORIDE	2.4	76	L
FERRIC OLEATE	2.6	68	L
FERRIC OXIDE	13. 1	75	L
FERROUS OXIDE	14. 2	60	S
FERROUS SULFATE	14. 2	58	L
FLEXOL A(PRODUCT)	3.5	75	L
FLOROSIL (RESIDUE)	25. 5	75	GR
FLOUR, BARLEY	3	75	P
FLOUR, WHEAT (2% H2O)	4	75	P
FLOUR, WHEAT (DRY)	3	75	P
FLOURINE (LIQUIFIED)	1.5	-322	L
FLURO METHYLBUTANE	5.9	68	L
FLUROBENZENE	5.4	75	L
FLUROBENZENE	4.8	140	L
FLUROPENTANE	4.2	68	L
FLUROTOLUENE	3.9	140	L

FLUROTOLUENE	4.2	86	L
FORMALDEHYDE	2.5	75	L
FORMAMIDE	84	68	L
FORMIC ACID	58. 5	60	L
FORMICA PRODUCT	1.3	75	S
FORSTERITE	6.2	75	S
FREON 11	3.1	70	L
FREON 113	2.6	70	L
FREON 12	2.4	70	L
FULLER'S EARTH	1.8	75	P
FURAN	2.9	76	L
FURFURAL	41	68	L
FURFURAL	46	32	L
FURFURAL	34	120	L
FURFURALDEHYDE	41. 9	68	L
GASOLINE, FUEL	2.1	75	L
GERMANIUM TETRACHLORIDE	2.4	75	S
GLASS, BOROSILICATE	4.8	75	S
GLASS, BUBBLES	1.8	75	S
GLASS, CORNING	6.5	70	S
GLASS, GROUND	3.3	75	GR
GLASS, MOLDING (BOTTLES)	3.7	75	S
GLASS, PYREX	4.3	75	S
GLASS, SILICA (WINDOW)	3.7	75	S
GLASS, VYCOR	3.8	75	S
GLASS,CULLET	2.5	75	S
GLUCOHEPTITOL	27	248	L
GLUE (ANIMAL) 3.6% H2O	2.6	75	L
GLYCERIN	47	68	L
GLYCERIN	34	220	L
GLYCERIN	50	150	L
GLYCEROL	43	68	L
GLYCEROL	47. 2	32	L
GLYCEROL	42. 5	77	L
GLYCEROL PHTHALATE (CAST)	3.7	75	S
GLYCERWE	3.9	75	L
GLYCERYL TRIOCTATE	6	70	L
GLYCOL	37	77	L
GLYCOL	41. 2	68	L
GLYCOL	35. 6	122	L
GLYCOLIC NITRITE	27	68	L
GLYCOLONITRILE	68	68	L
GRAIN (SPORGHUM)	5.4	75	GR
GRAIN ALCOHOL	24.	77	L

	3		
GRAIN ALCOHOL	41	-76	L
GRANITE	3.3	75	S
GRAPHITE	36.5	75	S
GUAIACOL	11	0	L
GUAR (TREE GUM)	3.5	75	S
GYPNUM	2.8	75	S
GYPNUM (3.5% H2O)	5.4	75	S
HAGEMANIII ESTER	10.6	68	L
HELIUM (1.055)	1.1	-358	GA
HEPTADECANONE	5.3	140	L
HEPTALDEHYDE	9.1	70	L
HEPTANE	1.9	68	L
HEPTANE	2.1	-130	L
HEPTANOIC ACID	2.6	160	L
HEPTANOL	6.1	70	L
HEPTANONE	11.9	68	L
HEPTENE	2.1	68	L
HEPTYL ALCOHOL	6.7	70	L
HERBICIDE (MONSANTO)	1.9	75	P
HEXACHLOROBUTADIENE	2.6	75	L
HEXACHLOROCYCLOHEXANE	4.7	310	L
HEXADECAMETHYLCYCLOCTASI	2.7	68	L
HEXADECANOL	3.8	120	L
HEXADIENE	2.2	75	L
HEXAMETHYLDISILAXANE	2.2	68	L
HEXAMETHYLENE DIAMINE	3.9	90	L
HEXAMTHYLENE	14.1	75	L
HEXANE	1.9	68	L
HEXANE	3.2	-200	L
HEXANETHYLDISILAXANE	2.2	75	L
HEXANOL	13.3	76	L
HEXANOL ALUM. ALKOXIDE (-N)	4.3	170	L
HEXANONE	14.6	59	L
HEXDECAMETHYLCYCLOHEPTASI	2.7	68	L
HEXENE	2	75	L
HEXOECANETHYLCYCLOHEPTASI	2.7	68	L
HEXYL IODIDE	6.6	68	L
HEXYLENE	2	62	L
HOMOPOLYMER	2.3	75	L
HYDRAZINE	52	68	L

HYDROCYANIC ACID	2.3	70	L
HYDROFLUORIC ACID	84	32	L
HYDROGEN (1.0002)	1	212	GA
HYDROGEN BROMIDE	3.8	76	L
HYDROGEN BROMIDE	7	-120	L
HYDROGEN CHLORIDE	6.4	5	L
HYDROGEN CHLORIDE	12	-188	L
HYDROGEN CHLORIDE	4.6	82	L
HYDROGEN CYANIDE	95.4	70	L
HYDROGEN FLUORIDE	17	-100	L
HYDROGEN IODIDE	3.4	-60	L
HYDROGEN IODIDE	2.9	72	L
HYDROGEN PEROXIDE	84.2	32	L
HYDROGEN SULFIDE	5.8	48	L
HYDROGEN SULFIDE	9.3	-120	L
HYDROXY-4-METHY-2-PENTANONE	18.2	76	L
HYDROXYETHYL ACETATE	13	85	L
HYDROXYMETHYLENE CAMPHOR	5.2	86	L
HYDROXYMETHYLENEBENZYL	6	68	L
HYDROZINE	52.9	68	L
IDOBUTANE	8.9	-110	L
IDO-IODOHEXADECANE	3.5	68	L
ILMENTE	6	75	P
INDANOL	7.8	140	L
INDIGO (DYE)	1.7	75	S
INK, BLACK, PERMANENT	4	32	L
INK, PRINTING	3.1	75	L
INK, PRINTING	2.5	240	L
IODETHANE	7.8	68	L
IODINE (CRYSTALS)	4	75	S
IODINE (MELTED)	11.8	224	L
IODIOCTANE	4.6	75	L
IODOBENZENE	4.6	68	L
IODOBUTANE	4.5	266	L
IODOBUTANE	6.2	68	L
IODODODECANE	3.9	68	L
IDOENTANE	5.8	68	L
IDOETHANE	10.2	-60	L
IDOHEPTANE	4.9	70	L
IDOHEXADECANE	3.5	68	L
IDOHEXANE	5.4	68	L
IODOMETHANE	7	68	L
IODOMETHYLBUTANE	5.6	68	L
IODOMETHYLPROPANE	6.5	68	L



IODOOCTANE	4.6	72	L
IODOPROPANE	7	68	L
IODOPROPENE	6.1	66	L
IODOTOLUENE	6.1	68	L
IODPOCTANE	4.6	76	L
IONONE	11	75	L
IONONE	10	68	L
IRON ORE	5.2	75	S
IRON ORE 2% H2O	10.2	75	S
IRON OXIDE	2.3	75	GR
IRON PENTACARBONYL	2.6	68	L
ISOAMYL ACETATE	4.6	85	L
ISOAMYL ALCOHOL	15.3	74	L
ISOAMYL BROMIDE	6.1	76	L
ISOAMYL BUTYRATE	3.9	68	L
ISOAMYL CHLORACETATE	7.8	68	L
ISOAMYL CHLORIDE	6.4	64	L
ISOAMYL CHLOROFORMATE	7.8	68	L
ISOAMYL ETHER	2.8	68	L
ISOAMYL IODIDE	5.6	65	L
ISOAMYL PROPIONATE	4.2	68	L
ISOAMYL SALICYLATE	5.4	68	L
ISOAMYL VALERATE	3.6	66	L
ISOBUTYL ACETATE	5.6	68	L
ISOBUTYL ALCOHOL	20.5	32	L
ISOBUTYL ALCOHOL	18.7	68	L
ISOBUTYL BENZOATE	5.9	68	L
ISOBUTYL BROMIDE	6.6	68	L
ISOBUTYL BUTYRATE	4	68	L
ISOBUTYL CHLORIDE	7.1	68	L
ISOBUTYL CHLOROFORMAE	9.2	68	L
ISOBUTYL CYANIDE	13.3	74	L
ISOBUTYL FORMATE	6.5	60	L
ISOBUTYL IODIDE	5.8	68	L
ISOBUTYL NITRATE	11.9	66	L
ISOBUTYL RININOLEATL	4.7	70	L
ISOBUTYL VALERATE	3.8	66	L
ISOBUTYLAMINE	4.5	70	L
ISOBUTYLAMINE	4.5	70	L
ISOBUTYLENE BROMIDE	4	68	L
ISOBUTYRIC ACID	2.6	68	L
ISOBUTYRIC ANHYDRIDE	13.9	68	L
ISOBUTYRONITRILE	20.8	75	L
ISOBUTYRONITRILE	20.	75	L

	8		
ISOBUTYVENZENE	2.3	62	L
ISOCAPRONITRILE	15.7	68	L
ISODECANOL	6.2	75	L
ISONATE	6.4	75	L
ISOPRENE	2.1	77	L
ISOPROPHYL ETHER	4.6	75	L
ISOPROPYL ALCOHOL	18.3	68	L
ISOPROPYL ETHER	3.9	75	L
ISOPROPYL NITRATE	11.5	66	L
ISOPROPYLAMINE	5.5	68	L
ISOPROPYLBENZENE	2.4	68	L
ISOPROPYLEETHER	3.9	77	L
ISOPROPYNOL POLYOL	11.6	75	L
ISOQUINOLINE	10.7	76	L
ISOSAFROL	3.4	70	L
ISOVALERIC ACID	2.7	68	L
ISOVALERONITRILE	18	72	L
JET FUEL (MILITARY-JP4)	1.7	70	L
KEROSENE (COMMERCIAL)	1.8	70	L
KRATION	1.3	75	GR
PVDF PLASTIC	2	75	S
LACTIC ACID	19.4	66	L
LACTONITRILE	38.4	68	L
LEAD ACETATE	2.5	75	S
LEAD CARBONATE	18.1	60	S
LEAD CHLORIDE	4.2	75	S
LEAD NITRATE	37.7	75	S
LEAD NOMOXIDE	25.9	60	S
LEAD OLEATE	3.2	64	L
LEAD OXIDE	25.9	75	S
LEAD OXIDE	3.6	75	GR
LEAD SULFATE	14.3	75	S
LEAD SULFIDE	17.9	75	S
LEAD TETRACHLORIDE	2.8	68	L
LIME	10.9	75	S
LIME	2.6	75	P
LIME (REBURNED)	2.2	75	GR
LIME 1% H2O	4.2	75	P

LIME 2% H2O	7.7	75	P
LIMESTONE	9	75	S
LIMESTONE .6% H2O	2.8	75	P
LIMESTONE 2% H2O	2.3	75	P
LIMONENE	2.3	68	L
LINOLEIC ACID	2.9	32	L
LITHIUM CHLORIDE	11.1	75	S
LONGNE	10	65	L
MAALONIC NITRILE	47	97	L
MAGNESIUM OXIDE	9.7	75	S
MAGNESIUM SULFATE (0.4% H2O)	2.2	75	P
MAGNESIUM OXIDE	2.4	75	GR
MALACHITE	7.2	75	S
MALEIC ANHYDRIDE	51	140	L
MALONONTRILE	46	98	L
MANDELIC NITRILE	18.1	73	L
MANDELONITRILE	17	72	L
MANDENITRILE	17	73	L
MANNITOL	3	71	L
MARGARINE	2.9	75	L
MELAMINE FORMALDEHYDE	5.5	75	L
MENTHOL	4	107	L
MENTHONE	11	-30	L
MENTHONE	8.8	65	L
MENTHONOL	2.1	110	L
MERCURIC CHLORIDE	3.2	75	S
MERCUROUS CHLORIDE	9.4	75	S
MERCURY (1.0007)	1	298	GA
MERCURY DIETHYL	2.3	68	L
MESITYL OXIDE	15.4	68	L
MESITYLENE	2.4	68	L
METHAL CYANOACETATE	29.4	69	L
METHANE (LIQ. NATURAL GAS)	1.7	-280	L
METHANOL	37.5	32	L
METHANOL	56.6	-112	L
METHANOL	33.1	68	L
METHELENE CHLORIDE	8.4	40	L
METHOXY-4-METHYLPHENOL	11	60	L
METHOXYBENZALDEHYDE	22	70	L
METHOXYBENZALDEHYDE	10.4	425	L
METHOXYBENZENE	4.3	76	L

METHOXYETHOANOL	16	85	L
METHOXYETHYL STEARATE	3.4	140	L
METHOXYPHENOL	11	82	L
METHOXYTOLUENE	3.5	68	L
METHYL	2.8	64	L
METHYL 5 KETOCYCLOHEXYLENE	24	68	L
METHYL ACETATE	7.3	68	L
METHYL ALCOHOL	56.6	-112	L
METHYL ALCOHOL	33.1	68	L
METHYL ALCOHOL	37.5	32	L
METHYL BENZOATE	6.6	68	L
METHYL BUTYL KETONE	12.4	62	L
METHYL BUTYRATE	5.6	68	L
METHYL CHLOROACETATE	12.9	68	L
METHYL CYANOACETATE	28	68	L
METHYL ETHER	5	78	L
METHYL ETHER	3	230	L
METHYL ETHYL KETONE	18.4	72	L
METHYL ETHYL KETOXIME	3.4	68	L
METHYL FORMATE	8.5	68	L
METHYL HEPTANOL	6.3	68	L
METHYL HEPTANOL	10.3	-4	L
METHYL HEPTENE	2.4	68	L
METHYL HEXANE	1.9	68	L
METHYL HEXENE	2.9	68	L
METHYL IODIDE	7.1	68	L
METHYL ISOPROPYLBENZENE	2.2	68	L
METHYL ISOTHIOCYANATE	19	85	L
METHYL KEXYL KETONE	10.7	62	L
METHYL MERCAPTAIN	7.6	35	L
METHYL METHACRYLATE RESIN	2.7	75	L
METHYL METHOXYBENZOATE	4.3	80	L
METHYL NITRATE	23	65	L
METHYL NITROBENZOATE	27	80	L
METHYL NONENE	2.1	68	L
METHYL OHLOROACETATE	12.9	68	L
METHYL O-METHOXYBENZOATE	7.8	70	L
METHYL PENTADIENE	3.2	-100	L
METHYL PENTADIENE	2.4	75	L

METHYL PENTADIENE	2.8	-13	L
METHYL PHENYL HYDRAZIN	7.3	66	L
METHYL PROPANOL	26	-30	L
METHYL PROPANOL	10. 9	85	L
METHYL PROPANOL	17. 7	75	L
METHYL PROPANOL	8.5	120	L
METHYL PROPIONATE	5.4	66	L
METHYL PROPYL KETONE	16. 8	58	L
METHYL P-TOLUATE	4.3	91	L
METHYL SALICYLATE	9	68	L
METHYL SULFIDE	6.2	68	L
METHYL THIOCYANATE	35. 9	68	L
METHYL VALERATE	4.3	66	L
METHYL-1-CYCLOPENTANOL	6.9	95	L
METHYL-1-PROPANOL	17. 7	77	L
METHYL-2,4-PENTANEDIOL	24. 4	86	L
METHYL-2-PENTANONE	18. 8	-75	L
METHYL-2-PENTANONE	13. 1	68	L
METHYL-4-TERT-BUTYBENZENE	2.3	68	L
METHYLAL	2.7	68	L
METHYLAMINE	10. 5	70	L
METHYLAMINE	9.4	77	L
METHYLANILINE	6	68	L
METHYLANILINE (-N)	6	68	L
METHYLBENZYLAMINE	4.4	65	L
METHYLBUTADIENE	2.1	75	L
METHYLBUTANE	1.8	68	L
METHYLBUTANOL	5.8	75	L
METHYLBUTENE	2.2	68	L
METHYLCYCLOHEXANE	2	68	L
METHYLCYCLOHEXANE	2.3	-200	L
METHYLCYCLOHEXANOL	13	68	L
METHYLCYCLOHEXANONE	13	68	L
METHYLCYCLOPENTANE	2	68	L
METHYLENE IODIDE	5.1	70	L
METHYLHEXANE	1.9	77	L
METHYLNAPHTHALENE	2.7	68	L
METHYLOCTANE	2	69	L
METHYLPHENYL HYDRAZIN	7.3	66	L
METHYLPYRIDINE	9.8	68	L
METHYL-S KETOCYCLOHEXYLENE	24	68	L

METHYLSULFATE	48	30	L
METHYLSULFATE	60	-30	L
METHYLSULFATE	42	68	L
METILOX (PRODUCT)	4.5	160	L
MICA	7	75	S
MILK, DRY	1.9	75	P
MISCELLA	3	75	L
MOCA	8.8	75	L
MOLD COMPOUND, COLD,	6	75	GR
MONOCHLORETHANE	10	75	L
MONOMYRISTIN	6.1	158	L
MONOPALMITIM	5.1	176	L
MONOPALMITIN	5.3	152	L
MONOSTEARIN	4.9	170	L
MORPHOLINE	7.3	75	L
NALKYLENE	2.1	75	L
NANENE	2	50	L
NAPHTHALENE	2.5	75	S
NAPHTHOLENE	2.5	75	L
NAPHTHYL ETHYL ETHER	3.2	67	L
NAPHTHA (REFINERY CUT)	2	75	L
NAPHTHALENE	2.5	68	L
NAPHTHALENE	2.3	185	L
NAPHTHONITRILE	6.4	70	L
NAPHTHONITRILE	16	160	L
NEON (1.0001)	1	68	GA
NIBROBENZENE	35. 7	68	L
NITROANILINE	34	194	L
NITROANILINE	56	320	L
NITROANISOLE	24	68	L
NITROBENZAL DOXIME	48. 1	248	L
NITROBENZENE	36. 1	68	L
NITROBENZENE	26. 3	176	L
NITROBENZENE	34. 9	77	L
NITROBENZYL ALCOHOL	22	68	L
NITROETHANE	19. 7	68	L
NITROETHANE	28	85	L
NITROGEN (LIQUIFIED)	1.5	336	L
NITROGLYCERIN	19	68	L
NITROMETHANE	39. 4	68	L
NITROPHENOL	17	120	L
NITROPROPANE	23. 2	85	L
NITROSODIMETHYLAMINE	54	68	L
NITROSYL BROMIDE	13.	4	L

	4		
NITROSYL CHLORIDE	18.2	10	L
NITROTOLUENE	25	68	L
NITROTOLUENE	22.2	137	L
NITROTOLUENE, (-M)	23.8	68	L
NITROUS OXIDE	1.6	32	L
NONANE	2.1	-60	L
NONANE	1.8	230	L
NONANE	2	68	L
NYLON (PLASTIC)	2	75	S
NYLON MOLTOEN (0.14% H2O)	1.9	75	L
NYLON PELLETS	1.1	75	GR
OCTADECANOL	3.4	136	L
OCTAMETHYLCYCLOTETRA DILO	2.4	68	L
OCTAMETHYLCYCLOTETRAS ILOXA	2.4	68	L
OCTAMETHYLTRISILOXANE	2.3	68	L
OCTANE	1.9	160	L
OCTANE	1.8	230	L
OCTANE (1.95)	1.9	68	L
OCTANOL	5.1	68	L
OCTANONE	12.5	-4	L
OCTANONE	7.4	212	L
OCTANONE	10.3	68	L
OCTENE	2	75	L
OCTYL ALCOHOL	3.4	64	L
OCTYL IODIDE	4.9	68	L
OCTYLENE	4.1	65	L
OIL, ALMOND	2.8	68	L
OIL, CABLE	2.2	80	L
OIL, CASTOL	4.7	60	L
OIL, CASTOL HYDROGENATED	10.3	80	L
OIL, CASTOR	2.6	80	L
OIL, COTTON SEED	2.7	57	L
OIL, CRISCO COOKING	2.2	130	L
OIL, FUEL (#2)	2.7	75	L
OIL, GRAPSEED	2.9	60	L
OIL, LEMON	2.3	70	L
OIL, LINSEED	3.4	55	L
OIL, MINERAL	2.1	80	L
OIL, MINERAL	1.6	170	L
OIL, MOTOR 10W40 AND SAE30	2.2	75	L
OIL, PARAFFIN	2.2	68	L

OIL, PEANUT	3	52	L
OIL, PEANUT	3.5	110	L
OIL, PEANUT	3.1	68	L
OIL, PETROLEUM	2	75	L
OIL, PETROLEUM	2.1	68	L
OIL, PYRANOL	5.3	68	L
OIL, SAFROL	3.1	70	L
OIL, SALAD, VEGTABLE	3	75	L
OIL, SESAME	3	55	L
OIL, SILICON	2.7	75	L
OIL, SOYBEAN	3	75	L
OIL, SPERM	3.2	68	L
OIL, TRANSFORMER	2.2	68	L
OIL, TRANSMISSION	2.2	80	L
OIL, TURPENTINE	2.2	68	L
OIL, VEGTABLE	3.3	230	L
OIL, VEGTABLE	4	100	L
OIL, OLIVE	3.1	68	L
OLEIC ACID	2.5	68	L
OLEIC ACID	2.5	68	L
OXALYL CHLORIDE	3.5	70	L
OXYGEN	1.5	-315	L
OXYLENE	2.6	68	L
PALM OIL STABILIZER (PRODUCT)	3	75	L
PALMITIC ACID	2.3	160	L
PAPER, WOOD, DRY	2	75	S
PARA NONYL PHENOL (PNP)	5.2	20	L
PARA NONYL PHENOL (PNP)	4.3	50	L
PARAFORMALDAHYDE	3.8	75	S
PARAFORMALIDE	2.8	75	L
PARALDEHYDE	14.5	68	L
PARATERTIARY BUTYL PHENOL	3.8	78	L
PARATERTIARY OCTYL PHENOL	4.4	100	L
PCBT	3.1	75	L
PEANUTS (FRESH)	27.4	75	GR
PEANUTS (ROASTED)	2	75	GR
PENTACHLOROETHANE	3.7	60	L
PENTACHLOROPHE #1	4.1	75	L
PENTADIENE	2.3	75	L
PENTAERYHRITOL	2	75	L
PENTANE	2	-130	L
PENTANE	1.8	68	L
PENTANEDIONE	25	68	L
PENTANETHIOL	4.2	120	L
PENTANETHIOL	4.6	75	L
PENTANOL	13	75	L

	9		
PENTANONE	22	-75	L
PENTANONE	15.4	68	L
PENTANONE OXIME	3.3	68	L
PENTENE	2.1	68	L
PERLITE (INSULATION)	1.2	75	S
PERMANGENATE	3	75	GR
PHENANTHIENE	2.8	68	L
PHENANTHRENE	2.7	230	L
PHENANTHRENE	2.8	68	S
PHENETOLE	4.5	70	L
PHENOL	4.3	50	S
PHENOL ETHER	9.8	85	L
PHENOL FORMALDEHYDE RESIN	4.5	75	S
PHENOL ISOBUTHYL	14.9	75	L
PHENOLIC RESIN	1.5	75	GR
PHENOXYACETYLENE	4.8	76	L
PHENTIDINE	7.3	70	L
PHENYL ACETATE	6.9	68	L
PHENYL ETHER	3.7	85	L
PHENYL ISOCYANATE	8.9	68	L
PHENYL ISO-THIOCYANATE	10.7	68	L
PHENYL PROPANONE	15	60	L
PHENYL PROPENE	2.2	68	L
PHENYL-1-PROPANE	2.7	68	L
PHENYLACETALDEHYDE	4.8	68	L
PHENYLACETIC	3	68	L
PHENYLACETONITRILE	18	80	L
PHENYLACETONITRILE	8.5	450	L
PHENYLETHANOL	13	68	L
PHENYLETHANOL	7.6	200	L
PHENYLETHANOL	9	110	L
PHENYLETHYL ACETATE	4.5	58	L
PHENYLHYDRAZINE	7.2	72	L
PHENYLSALICYLATE	6.3	120	L
PHEONOL	4.3	50	S
PHOSGENE	4.3	70	L
PHOSGENE	4.7	32	L
PHOSPHATE ROCK (GROUND)	4.2	75	P
PHOSPHATE ROCK, (PEBBLE SIZE)	5.4	75	GR
PHOSPHINE	2.5	-76	L
PHOSPHONYL CHLORIDE	13.3	70	L
PHOSPHOROUS (RAW)	3.4	75	GR
PHOSPHOROUS (RAW) (RED)	4.1	75	S
PHOSPHOROUS (RAW)	3.6	75	S

(YELLOW)			
PHOSPHOROUS OXYCHLORIDE	14	72	L
PHOSPHORUS PENTACHLORIDE	2.8	320	L
PHOSPHORUS RIBROMIDE	3.9	68	L
PHOSPHORUS TRICHLORIDE	3.4	77	L
PHOSPHORUS TRICHLORIDE	3.7	64	L
PHOSPHORUS TRIIODIDE	4.1	150	L
PHOSPHORYL CHLORIDE	13	70	L
PHOTO-RESIST (CIRCUIT BOARDS)	2.4	75	L
PHTHALIDE	36	166	L
PINACOLIN	12.8	62	L
PINACONE	7.4	75	L
PINENE	2.7	70	L
PIPERDINE	5.9	68	L
PITCH (LESS THAN 1% H2O) (FINE)	4.3	75	GR
PLASTER	2.5	75	P
PLATINUM CATALYST	6.5	75	P
POLYACRYLIC ESTER PLASTIC	3.5	75	S
POLYCAPROLACTAN PLASTIC	2	75	S
POLYCARBONATE (PLASTIC	1.9	75	GR
POLYCARBONATE PLASTIC	2.1	75	S
POLYCARBONATE RESIN	1.2	75	L
POLYESTER (PLASTIC CHIPS)	1.9	75	GR
POLYESTER (PLASTIC FLAKES)	2	75	GR
POLYESTER (PLASTICS POWDER)	1.4	75	P
POLYESTER RESIN	2.8	75	P
POLYESTER RESIN	5.5	75	L
POLYESTER RESIN (FLEXIBLE)	4.1	75	S
POLYESTER RESIN (GLASS FIBER	4	75	S
POLYESTER RESIN (RIDGID CAST)	2.8	75	S
POLYETHLENE (PLASTIC CHIPS)	1.6	120	GR
POLYETHLENE (PLASTIC FLUFF)	1.5	75	GR
POLYETHYLENE (CHIPS)	1.2	75	GR
POLYETHYLENE PLASTIC	2.2	68	S
POLYGLYCOL	9.4	75	L
POLYMER	1.8	75	GR
POLYMIDE	2.8	75	S
POLYMONOCHLORO	2.5	75	L
POLYOL	49.	75	L

	5		
POLYPHOPLENE	1.3	75	P
POLYPHOPOLENE (PLASTIC)	1.8	75	GR
POLYPROPELENE (PLASTIC)	1.6	75	GR
POLYPROPOLENE (PLASTIC)	1.5	75	GR
POLYPROPYLENE	1.5	75	S
POLYSTYRENE PLASTIC (PELLETS)	1.9	75	GR
POLYSTYRENE RESIN	2.4	75	S
POLYTETRA FLUOROETHYLENE	2	75	S
POLYVINLY IDENE CHLORIDE	2	75	S
POLYVINYL CHLORIDE (PVC)	3.4	75	S
POLYVINYLCHLORIDE (PVC)	1.7	75	P
POLYYSTYRENE PLASTIC (	1.7	75	GR
POPCORN	5.7	75	S
PORCELAIN	5	75	S
PORCELAIN WITH ZIRCON	7.1	75	S
POTASSIUM ALUMINUM SULPHATE	3.8	75	S
POTASSIUM CARBONATE	5.6	60	S
POTASSIUM CHLORATE	5.1	75	S
POTASSIUM CHLORIDE	5	75	S
POTASSIUM CHLORONATE	7.3	75	S
POTASSIUM IODIDE	5.6	75	S
POTASSIUM NITRATE	5	75	S
POTASSIUM SULFATE	5.9	75	S
PRESS CAKE (VEGTABLE OIL MILL)	3.2	75	S
PROPANE (PRESSURIZED)	1.6	32	L
PROPANEDIOL	32	68	L
PROPANEDIOL DINITRATE	19	68	L
PROPANETRIOL	19	68	L
PROPANOL	38	-112	L
PROPANOL	20	75	L
PROPANOL	29	-30	L
PROPENE	1.8	112	L
PROPENE	1.5	185	L
PROPENE	1.3	197	L
PROPENE	1.9	68	L
PROPENE	1.7	150	L
PROPENE	1.4	194	L
PROPENYL DIMETHOXY BENZENE	4.7	65	L
PROPENYL METHYLENE DIOXYB	3.3	70	L
PROPIONALDEHYDE	18.9	62	L
PROPIONIC ACID	3.1	66	L
PROPIONIC ANHYDRIDE	18	60	L
PROPIONITRILE	27.	68	L

	7		
PROPYL ACETATE	6.3	68	L
PROPYL ALCOHOL	21.8	68	L
PROPYL BENZENE	2.4	68	L
PROPYL BROMIDE	7.2	68	L
PROPYL BUTYRATE	4.3	68	L
PROPYL CHLOROFORMATE	11.2	68	L
PROPYL ETHER	3.3	78	L
PROPYL FORMAT	7.9	66	L
PROPYL NITRATE	14.2	64	L
PROPYL PROPIONATE	4.7	68	L
PROPYL VALERATE	4	65	L
PSUEDOCUMENE	2.4	60	L
PTALIC	31	75	L
PULEZONE	9.7	66	L
PULP, WOOD, DRY	4.8	75	GR
PYRAZINE	2.8	120	L
PYRIDINE	12.5	68	L
PYRROLE	7.5	65	L
QUARTZ	4.3	75	S
QUINOLINE	9	77	L
QUINOLINE	5.1	460	L
QUINONE	3.7	75	L
RAISINS (SUN DRIED)	4.8	75	GR
REFRACTORY (FOR CASTING)	1.8	75	P
RERACTORY (CAST)	6.7	75	S
RESOPSINOL (GROUND)	1.8	75	GR
RESORCINOL	3.2	75	S
RICE (CRISP)	1.5	75	GR
RICE (STORAGE BIN)	5.4	75	GR
RICE(DRY)	3.5	75	GR
RJ-100 PLASTIC (1% H2O) (PELLETS)	1.9	75	GR
RJ-100 PLASTIC (1.5% H2O) (CHIPS)	7	75	GR
RONGE	1.5	75	S
ROUGE (JEWELERS)	1.5	75	P
RUBBER (CHLORINATED)	3	75	S
RUBBER (HARD)	3	75	S
RUBBER (ISOMERIZED)	2.4	75	S
RUBBER, FOAM	1.1	75	S
RUTILE	6.7	75	S
SALICYALDEHYDE	17	85	L
SALICYLALDEHYDE	13.9	68	L
SALT (COOKING)	3.4	75	GR
SAND RECLAMIED FOUNDRY	4	75	GR



SAND, SILICATE	2.2	75	GR
SAWDUST, (DRY)	1.6	75	GR
SELENIUM	11	75	S
SELENIUM	5.4	480	L
SHELLAC	3.5	75	S
SILICA (FUMED) (1.0110)	1	75	GA
SILICA, PRECIPITATED	1.9	75	S
SILICON	11.1	75	S
SILICON CARBIDE	5.8	75	P
SILICON TETRACHLORIDE	2.4	60	L
SILVER BROMIDE	12.2	75	S
SILVER CHLORIDE	11.2	75	S
SILVER CYANIDE	5.6	75	S
SLATE	7	75	S
SMITHSONITE	9.3	75	S
SOAP POWDERS (IN BOX)	1.3	75	P
SODA, BAKING	1.8	80	P
SODIUM BICARBONATE	1.8	80	GR
SODIUM CARBONATE (10 H2O)	5.3	75	S
SODIUM CARBONATE (ANHYD.)	8.4	75	S
SODIUM CHLORIDE	6.1	75	S
SODIUM CHLORIDE	3.2	75	GR
SODIUM NITRATE	5.2	75	S
SODIUM OLEATE	2.8	75	S
SODIUM PERCHLORATE	5.4	75	S
SODIUM SILICATE ( IN WATER)	88	75	L
SODIUM SILICO ALUMINATE	4.3	75	GR
SODIUM SULPHATE	2.7	75	L
SODIUM TRIPOLYPHOSPHATE	2.3	75	GR
SOLVENT (NON FLAMABLE)	7.1	75	L
SORBITAL	67	90	L
SORBITAL	33.5	176	L
SOY BEANS	2.8	75	GR
SOYBEAN MEAL	3.1	75	GR
STANNIC CHLORIDE	3.2	72	L
STARCH (VEGETABLE)	4.7	75	GR
STEAM (1.008)	1	212	GA
STEARIC ACID	2.3	160	L
STEATITE	5.5	75	S
STIBINE	2.5	-58	L
STIBINE	2.9	-112	L
STYRENE (PLASTIC)	2.4	77	L
STYRENE (PLASTIC)	2.4	75	S
SUCCINAMIDE	2.9	72	L

SUCCINIC ACID	2.4	78	L
SUCCINONITRILE	53	150	L
SUCCINONITRILE	56	130	L
SUCCINONITRILE	52	170	L
SUCROSE	3.3	75	S
SUGAR, CANE (DRY)	3	75	S
SULFUR	2.2	75	GR
SULFUR	3.5	447	L
SULFUR	3.4	75	S
SULFUR	3.4	752	L
SULFUR (3.55)	3.5	244	L
SULFUR DIOXIDE	14	68	L
SULFUR DIOXIDE	17.6	-4	L
SULFUR DIOXIDE	2.1	310	L
SULFUR DIXOIDE	15.6	32	L
SULFUR MONOCHLORIDE	4.8	58	L
SULFUR TRIOXIDE	3.1	64	L
SULFUR TRIOXIDE	3.6	70	L
SULFURIC ACID	84	68	L
SULFURIC OXYCHLORIDE	9.2	72	L
SULFUROUS OXYCHLORIDE	9.1	72	L
SULFURYL CHLORIDE	10	72	L
SUNFLOWER SHELLS	1.3	75	GR
TALLOWAMINE (HYDROGENATE)	2.6	108	L
TANTALUM OXIDE	11.6	75	S
TARTARIC ACID	6	68	L
PTFE	2	75	S
TERAPHALIC ACID	2.2	100	GR
TEREPHTALIC ACID	1.9	75	GR
TERPENE RESIN	2.3	75	L
TERPINENE	2.7	70	L
TERPINEOL	2.8	68	L
TETRABROMOBISPHENOL	2.5	75	GR
TETRABROMOETHANE	7.1	68	L
TETRABROMOETHANE	8.6	37	L
TETRABROMOETHANE	7	72	L
TETRACHLOROETHANE	8.2	68	L
TETRACHLOROETHYLENE	2.5	70	L
TETRADECAMETHYLCYCLO HEPTA	2.7	68	L
TETRADECAMETHYLHEXASI LOXA	2.5	68	L
TETRADECANOL	4.7	100	L
TETRADECANOL	4.4	120	L
TETRAETHYL AMYLENETETRARAR	4.4	66	L
TETRAETHYL HEXANE-1-PHENYL	5.9	68	L

TETRAETHYL PENTANE DIPHENY	2.7	68	L
TETRAETHYL PROPANE TETRACA	5.2	66	L
TETRAETHYL PROPYLENE TETRA	6	66	L
TETRAETHYL SILICATE	4.1	68	L
TETRAFLUROETHYLENE (FEP)	2	75	S
TETRAHYDRO-B-NAPHTHOL	8.1	140	L
TETRAHYDRO-B-NAPHTHOL	11	68	L
TETRAHYDRO-B-NAPHTHOL	6.7	195	L
TETRAHYDRONAPHTHALENE	2.8	68	L
TETRALONE (CRUDE)	4.9	75	L
TETRAMETHYL PENTANONE	10	60	L
TETRAMETHYL SILICATE	6	68	L
TETRAMETHYLTHIOMETHANE	2.8	160	L
TETRANITROMETHANE	2.2	68	L
TETRATRIACONTADIENE	2.8	76	L
THALLIUM CHLORIDE	46.9	75	S
THF	7.5	75	L
THIOACETIC ACID	13	68	L
THIONYL BROMIDE	9.1	68	L
THIONYL CHLORIDE	9.3	68	L
THIOPHENE	2.8	68	L
THIOPHOSPHORYL CHLORIDE	5.8	70	L
THORIUM OXIDE	10.6	75	S
THUJONE	10	35	S
TIN TETRACHLORIDE	2.9	68	L
TITANIUM DIOXIDE (T102)	2.4	75	GR
TITANIUM TETRACHLORIDE	2.8	68	L
TOBACCO DUST (6% H2O)	1.7	75	P
TOBACCO DUST (8% H2O)	2.3	75	P
TOLUENE	2.4	75	L
TOLUENE	2	360	L
TOLUENE	2.4	32	L
TOLUENE	2.2	260	L
TOLUIDINE	3	68	S
TOLUIDINE	5	130	L
TOLUIDINE	6	68	L
TOLUIDINE	3	75	S
TOLUIDINE	4	392	L
TOLUIDINE, (-M)	6	64	L
TOLUNITRILE	18.8	73	L
TOLYL METHYL ETHER	3.5	68	L
TONER, FOR PHOTO COPIER	1.6	75	P

TOTANE	5.5	111	L
TOULENE	2.4	75	L
TOURMALINE	6.3	75	S
TRANS-3-HEXANE	2	76	L
TRIBROMOPROPANE	6.4	68	L
TRIBUTYLPHOSPHATE	8	86	L
TRICHLOROACETIC ACID	4.5	141	L
TRICHLOROBUTYRALDEHYDE	10	65	L
TRICHLOROETHANE	7.5	68	L
TRICHLOROETHYLENE	3.4	61	L
TRICHLOROLOLUENE	6.9	70	L
TRICHLOROPROPANE	2.4	76	L
TRICHLOROTOLUENE	6.9	70	L
TRICHLOROXOLUENE	6.9	75	L
TRICOSANONE	4	176	L
TRICRESYL PHOSPHATE	6.9	104	L
TRIETHYL ACONITATE	6.4	68	L
TRIETHYL ALUMINUM	2.9	68	L
TRIETHYL ETHANETRICARBOX	6.5	66	L
TRIETHYL ISOACONITATE	7.2	68	L
TRIETHYLAMINE	2.4	77	L
TRIFLUOROACETIC ACID	26	12	L
TRIFLUOROTOLUENE	9.2	86	L
TRIFLUOROTOLUENE	8.1	140	L
TRIMETHYL BORATE	8.2	68	L
TRIMETHYL-3-HEPTENE	2.2	68	L
TRIMETHYLAMINE	2.9	39	L
TRIMETHYLAMINE	2.5	77	L
TRIMETHYLBENZENE	2.3	68	L
TRIMETHYLBUTANE	1.9	68	L
TRIMETHYLHEPTENE	2.2	68	L
TRIMETHYLPENTANE	2	68	L
TRIMETHYLSULFANILIC ACID	89	64	L
TRINITROBENZENE	2.2	68	L
TRIOLEIN	3.2	75	L
TRIPALMITIN	2.9	140	L
TRIPHENYLMETHANE	2.5	212	L
TRISTEARIN	2.8	158	L
TRUFLUROACETIC ACID	39	68	L
TURPENTINE (WOOD)	2.2	68	L
UITRIDE	5.4	75	L
UNDECANE	1.8	375	L
UNDECANE	1.8	300	L
UNDECANE (1.82)	2	14	L
UNDECANE (2.03)	2	68	L
UNDECANONE	8.4	58	L
UREA	3.5	71	L



UREA	3.5	75	S
UREA FORMALDEHYDE	6.4	75	P
URETHAN	14. 2	121	L
URETHANE	3.2	74	L
URETHANE RESIN	6.5	75	P
VALERALDEHYDE	11. 8	58	L
VALERIC ACID	2.6	68	L
VALERONITRILE	17. 7	70	L
VANADIUM OXYBROMIDE	3.6	78	L
VANADIUM OXYBROMIDE	4.4	-94	L
VANADIUM OXYCHLORIDE	3.4	78	L
VANADIUM TETRACHLORIDE	3	78	L
VEPATROL	4.5	73	L
VINYL BUTYRAL	3.3	75	S
VINYL CHLORIDE (FLEXIBLE)	3.5	75	S
VINYL CHLORIDE (RIDGID)	2.8	75	S
VINYL CHLORIDE ACETATE	3	75	S
VINYL ETHER	3.9	68	L
VINYL FORMAL	3	75	L
VINYL IDENE CHLORIDE	3	75	S
VINYL PROLIDONE	21. 2	75	L
WATER	88	32	L
WATER	48	212	L
WATER	80	68	L
WATER	34. 5	390	L
WATER (STEAM) (1.008)	1	68	GA
WAX, (PARA WAX)	2.3	75	S
WAX, BEES'	2.7	75	S
WAX, BIWAX	2.5	75	S
WAX, CARNAUBA	2.9	75	S

WAX, CERESE	2.4	75	S
WAX, HALOWAX	4.5	75	S
WAX, PARAFFIN	1.9	250	L
WAX, PARAFFIN	2.2	75	S
WAX, PETROLEUM	2.1	300	L
WAX, PETROLEUM	3	200	L
WAX, SANTOWAX	2.3	70	L
WAX,OPAL	3.1	75	S
WHEAT	4.8	75	GR
WHEAT FLOUR	3	75	P
WOOD ALCOHOL	37. 5	32	L
WOOD ALCOHOL	56. 6	-112	L
WOOD ALCOHOL	33. 1	68	L
XXX	1.8	80	P
XYLENE (PHOTO DEVELOPER)	2.3	75	L
XYLENE, (-M)	2.4	68	L
XYLENOL	3.9	62	
XYLIDINE	5	68	L
XYLITOL	40	68	L
XYLOL	2.3	75	L
YEAST	2.7	75	GR
ZINC CARBONATE	5	75	L
ZINC PHOSPHATE	49	75	GR
ZINC SULFIDE	8.2	75	S
ZIRCHRONIUM TETRACHLORIDE	5	75	L
ZIRCON	12	75	S
ZIRCONIUM OXIDE	12. 5	75	S
ZIRCONIUM SILICATE	5	75	S

## 9. BIBLIOGRAFÍA:

### Instituciones:

Una gran variedad de estudios paralelos surgieron para conocer las propiedades dieléctricas y calentamiento de los materiales bajo microondas, siendo los años ochenta del siglo pasado el punto de inflexión donde empresas y administración empezaron a poner sus focos en el conocimiento y posible impacto de la tecnología de microondas en la industria. Esta tecnología tiene dos focos principales, el primero y fundamental el factor económico intentando reducir los costes productivos, y otro ambiental, reduciendo las emisiones de gases ricos en carbono y tratamientos de residuos ya existentes.

Como se comentó al principio de la memoria la mayoría los estudios realizados fueron llevados a cabo por Universidades, centros tecnológicos y científicos afines a éstos. Cabe destacar el peso de los centros indios y anglosajones (británicos, americanos y surafricanos) y en menor medida los centros iraníes.

A continuación se nombran algunas de las instituciones encargas de los estudios:

- *Department of Chemistry, Gulbarga University, Gulbarga 585 106, India*
- *R.N.S. Institute of Technology, Channasandra, Bangalore 560 061, India.*
- *Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology (IIT), Kharagpur, P.O. Kharagpur Technology, West Bengal – 721302, India.*
- *Research & Development Centre for Iron & Steel, Steel Authority of India Limited, Ranchi, Jharkhand, Pin-834002, India.*
- *School of Chemical Engineering, University of KwaZulu-Natal, Faculty of Engineering, Howard College Campus, King George V. Avenue, Durban – 4041, South Africa.*
- *School of Chemical Enironmental and Mining Engineering, University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK.*
- *Microwave Application Group Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e dell’Ambiente, Università di Modena e Reggio Emilia, Via Vignolese 905, 41125 Modena, Italy.*
- *Sonochemistry Centre, Faculty of Health and Life Sciences, Coventry University, CV1 5FB, UK.*

- *Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology (NIT), Deemed University, Rourkela 769 008, India.*
  - *Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology (IIT) Kharagpur, Kharagpur 721 302, India.*
  - *Department of Materials Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, FL 32611 -6400, USA.*
  - *School of Chemical Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham, University Road, Nottingham, NG7 2RD, UK.*
  - *Department of Chemical Engineering, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa.*
  - *School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK.*
  - *Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology (NIT), Deemed University, Rourkela 769 008, India.*
  - *Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology (IIT) Kharagpur, Kharagpur 721 302, India.*
  - *Department of Materials Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, FL 32611 -6400, USA.*
  - *School of Chemical Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham, University Road, Nottingham, NG7 2RD, UK.*
  - *Department of Chemical Engineering, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa.*
  - *School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK.*
- 
- Búsquedas en internet.
  - Bibliografía de clases.
  - Libros electromagnetismo.



PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS MATERIALES DEL SECTOR  
METALURGICO PARA SU POSTERIOR APLICACION EN MICROONDAS.

