

JULIO
2012

PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE PROYECTOS LINEALES REPETITIVOS

TRABAJO FIN DE MASTER

Autora: SUSANA LAGE CAL

Directora: NIEVES ROQUEÑÍ GUTIÉRREZ

MASTER DE DIRECCIÓN DE PROYECTOS

Planificación y Control de Proyectos Lineales Repetitivos

Construcción de una Línea Eléctrica

AUTORA: Susana Lage Cal

DIRECTORA: Nieves Roqueñí Gutiérrez

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 14 |
| 2.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL LSM | 15 |
| 2.2 DIAGRAMA ESPACIO-TEMPORAL DEL LSM | 18 |
| 2.2.1 EL MARCO DEL DIAGRAMA LSM..... | 19 |
| 2.2.2 REPRESENTACIÓN DE LAS ACTIVIDADES..... | 21 |
| 2.2.3 LSM vs CPM/PERT. SIMILITUDES Y DISCREPANCIAS. | 24 |
| 3. REVISIÓN DEL “ESTADO DEL ARTE” | 26 |
| 4. APLICACIÓN DEL LSM A PROYECTOS LINEALES DE TENDIDOS DE LÍNEAS ELÉCTRICAS | 27 |
| 4.1 DESCRIPCIÓN..... | 28 |
| 4.2 FORMULACIÓN..... | 28 |
| 4.3 OBJETIVOS | 28 |
| 4.4 PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS | 29 |
| 5. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN . | 30 |
| 5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO CON GANTT y LSM. IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMINOS CRÍTICOS CON PERT y KRLPM..... | 35 |
| 5.2.1 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO | 35 |
| 5.2.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMINOS CRÍTICOS | 37 |
| 5.3 CONTROL DEL PROYECTO MEDIANTE EL MÉTODO DEL VALOR GANADO..... | 42 |
| 5.3.1 DESCRIPCIÓN DEL AVANCE DEL PROYECTO | 42 |
| 5.3.2 CONTROL DEL PROYECTO | 51 |
| 6. CONCLUSIONES | 69 |
| 7. REFERENCIAS | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama LSM para un proyecto de gaseoducto con actualizaciones respecto a la línea base..... | 17 |
| Figura 2. Diagrama LSM para un proyecto de carretera con desmonte y terraplén..... | 19 |
| Figura 3. Diagrama LSM para un proyecto de carretera con tramos de desmonte, terraplén, puente y túnel..... | 20 |
| Figura 4. <i>Actividades 1 y 2.</i> Dos actividades de naturaleza lineal, susceptibles de ser llevadas a cabo por el mismo equipo de trabajo..... | 21 |
| Figura 5. <i>Actividad 3.</i> Montaje de equipamiento. Comienza en el km 1+100 y termina en el km 1+300, empieza en el día 2 y dura 14 días..... | 22 |
| Figura 6. <i>Actividad 4.</i> Tendido de catenaria, con inicio el día 8 y fin el día 21. Cada día el equipo de trabajo ocupará 300 m de vía..... | 22 |
| Figura 7. <i>Actividad 5.</i> Asfaltado de carretera, que comienza en el km 1+900, termina en el km 2+000 y precisa de un día antes de que el equipo se desplace a la siguiente sección (km 1+800, 1+900)..... | 23 |
| Figura 8. <i>Actividad 6.</i> Actividad no lineal..... | 23 |
| Figura 9. Actividades varias que han sufrido interrupciones..... | 24 |
| Figura 10. Planificación del proyecto con diagrama de Gantt..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 11. Planificación del proyecto con LSM. Diagrama espacio-temporal..... | 37 |
| Figura 12. Cálculo del Camino Crítico con el diagrama PERT..... | 38 |
| Figura 13. Camino Crítico sobre diagrama espacio-temporal. Cálculo con KLRPM..... | 41 |
| Figura 14. Planificación Inicial del Proyecto. Diagrama espacio-temporal LSM con histograma de costes..... | 44 |
| Figura 15. Planificación correspondiente a la Ejecución Real del Proyecto. Diagrama espacio-temporal LSM con histograma de costes..... | 48 |
| Figura 16. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Mano de Obra”..... | 54 |
| Figura 17. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el C.C. “Mano de Obra”..... | 56 |
| Figura 18. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Máquinas”..... | 58 |
| Figura 19. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el C.C. “Máquinas”..... | 60 |
| Figura 20. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Centro de Transformación”..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el C.C. “Centro de Transformación”..... | 64 |
| Figura 22. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el Proyecto Completo..... | 66 |
| Figura 23. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el Proyecto Completo..... | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Métodos de Planificación idóneos para los diferentes tipos de proyecto..... | 13 |
| Tabla 2. Información Básica del Proyecto..... | 34 |
| Tabla 3. Duración de Tareas y Recursos del Proyecto. Planificación Inicial..... | 45 |
| Tabla 4. Calendario de Costes según la Planificación Inicial..... | 46 |
| Tabla 5. Calendario de Facturación según la Planificación Inicial..... | 46 |
| Tabla 6. Duración de Tareas y Recursos del Proyecto. Ejecución Real..... | 49 |
| Tabla 7. Calendario de Costes según Ejecución Real..... | 50 |
| Tabla 8. Calendario de Facturación según la Ejecución Real..... | 50 |
| Tabla 9. BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Mano de Obra”. Valores Absolutos y Acumulados..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Tabla 10. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el C.C. “Mano de Obra”..... | 54 |
| Tabla 11. Evolución temporal de EAC y VAC para el C.C. “Mano de Obra”, según los distintos Pf..... | 55 |
| Tabla 12. BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Máquinas”. Valores Absolutos y Acumulados..... | 57 |
| Tabla 13. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el C.C. “Máquinas”..... | 58 |
| Tabla 14. Evolución temporal de EAC y VAC para el C.C. “Máquinas”, según los distintos Pf..... | 59 |
| Tabla 15. BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Centro de Transformación”. Valores Absolutos y Acumulados..... | 61 |
| Tabla 16. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el C.C. “Centro de Transformación”..... | 62 |
| Tabla 17. Evolución temporal de EAC y VAC para el C.C. “Centro de Transformación”, según los distintos Pf..... | 63 |
| Tabla 18. BCWS, BCWP y ACWP para el Proyecto Completo. Valores Absolutos y Acumulados..... | 65 |
| Tabla 19. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el Proyecto Completo..... | 66 |

Tabla 20. Evolución temporal de EAC y VAC para el Proyecto Completo,
según los distintos Pf.....67

1. INTRODUCCIÓN

La **planificación de un proyecto** es, normalmente, la piedra angular del “Project Management”. No sólo permite definir e integrar el trabajo de todas las partes interesadas si no que proporciona una herramienta básica para el seguimiento de coste, plazo y calidad. Además, a partir de la dicha planificación se generan los sucesivos calendarios del proyecto y se establecen los hitos¹ (tanto de recepción y de entrega como de cobro).

El método más adecuado para planificar un proyecto depende de la naturaleza del mismo. Y una buena forma de describir dicha naturaleza es a través de parámetros tales como: tamaño, nivel de complejidad, duración y carácter singular/repetitivo.

Así, para un proyecto sencillo, un **diagrama de Gantt** puede ser suficiente. Se trata de un método gráfico que resulta muy intuitivo. Además, existen herramientas informáticas ampliamente difundidas (por ejemplo, *Microsoft Project*), de uso sencillo y que facilitan significativamente las actualizaciones. Tiene en su contra que la información que proporciona tiene carácter exclusivamente temporal.

Cuando, por el contrario, nos encontramos con proyectos más complejos, habrá que emplear métodos de planificación que también lo sean. Fundamentalmente, **CPM** y **PERT** para **proyectos singulares** y **LSM** y **LOB** para **proyectos de naturaleza repetitiva**.

Se entiende por **proyectos singulares** aquellos en los que las actividades que los componen no se repiten o, si lo hacen, no es de manera ordenada.

Un ejemplo de **proyecto singular** es la **Construcción de una Planta Industrial**. En él, la *tarea-resumen “Montaje Mecánico”* engloba una gran cantidad de actividades de *ensamblaje y soldadura*, pero que no siguen ninguna secuencia temporal ni tienen una disposición espacial ordenada.

¹ Calendarios e hitos tienen, frecuentemente, carácter vinculante, formando parte del cuerpo de los contratos.

Por el contrario, los **proyectos repetitivos** se caracterizan por estar constituidos (total o parcialmente) por actividades que se repiten en un orden constante².

Un ejemplo es la **Construcción de un Túnel con Técnicas Mineras**. Ésta se llevará a cabo por tramos y, en cada uno de ellos, la secuencia de actividades será la siguiente: 1.- Perforación, 2.- Voladura, 3.- Retirada de Escombros, 4.- Sostenimiento o Gunitado.

CPM es el acrónimo de *Critical Path Method* o *Método del Camino Crítico* y **PERT** de *Program Evaluation and Review Technique*. Más que métodos de planificación se trata de metodologías de control que nos permiten “hacer preguntas” sobre el avance del proyecto.

Ambos incorporan el concepto del “**Camino Crítico**”³ y presentan la ventaja de su amplia difusión (lo que lleva asociada la existencia de abundante software comercial). CPM y PERT tan sólo se diferencian en:

1. La nomenclatura.
2. El CPM puede incluir una relación entre coste y duración de las actividades⁴, que el PERT no considera.
3. El PERT introduce una estimación probabilística de la duración de las actividades.

Por otro lado, **LSM** es el acrónimo de *Linear Schedule Method* o *Método de Planificación Lineal* y **LOB** de *Line of Balance Method*. Ambos son métodos de planificación para proyectos repetitivos y tienen una vertiente gráfica muy importante. Están **basados en la optimización de los recursos**⁵ y nos proporcionan información de las tasas de ejecución y de la duración de las

² Ver tabla 1.

³ Formado por las actividades que no tengan holgura y cuyo eventual retraso se transforme en retraso del proyecto. Puede variar a lo largo del avance del mismo.

⁴ Modificación incluida “a posteriori” por J. E. Kelley, al estimar la duración de las actividades para un nivel de coste dado.

⁵ Ni tiempos muertos ni sobreasignaciones.

diferentes actividades. Sin embargo, LSM está pensado para proyectos repetitivos de **naturaleza lineal** (carreteras, tendidos eléctricos, trazados ferroviarios, túneles, oleoductos...) y LOB para proyectos repetitivos de **naturaleza discreta** (urbanizaciones, rascacielos...).

Así, el LSM se basa en **un único Diagrama Espacio-Tiempo**, en el que aparecen representadas todas las actividades del proyecto. Dado que los datos representados en el eje X (dimensión espacial) provienen directamente de la realidad, resulta muy intuitivo, por lo que la curva de aprendizaje se acorta significativamente. Además, al disponer de toda la información en un único documento, se facilita la identificación de los conflictos espacio-temporales, lo que permite anticiparse a ellos y tomar las medidas oportunas.

Por el contrario, en el método LOB se emplean tres diagramas, todos ellos referenciados al *elemento unitario* (e. u.) característico de cada proyecto. Dicho e. u. puede ser, por ejemplo, una casa, cuando el proyecto es una urbanización o un piso, cuando el proyecto es un edificio:

1. **Diagrama de Producción.** Muestra las relaciones entre las actividades necesarias para completar un único e. u. y aporta información temporal sobre las mismas. Un diagrama de Gantt sería un formato posible, aunque existen otros.
2. **Diagrama de Objetivos.** En él aparecen representados la totalidad de los e. u. que conforman el proyecto, frente al tiempo. Presenta ciertas analogías con el Diagrama Espacio-Tiempo del LSM.
3. **Diagrama de Progreso.** Muestra el grado de progreso en la ejecución de cada e.u.

| TIPO DE PROYECTO | CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL PROYECTO | MÉTODO DE PLANIFICACIÓN IDÓNEO |
|---|---|--|
| <p>Lineal y de carácter continuo: autopistas, túneles, tendidos eléctricos, de tuberías o de vías de tren.</p> | <p>Pocas actividades y carácter repetitivo de las mismas.</p> | <p>LSM (<i>Linear Schedule Method</i> o Método de Planificación Lineal)</p> |
| <p>Repetitivo y no lineal: edificios (unidad repetida=piso), urbanizaciones (unidad repetida=casa)</p> | <p>El producto final está constituido por un grupo de unidades iguales.</p> | <p>LOB (<i>Line Of Balance</i>)</p> |
| <p>Proyectos singulares y complejos: refinerías, plantas industriales...</p> | <p>Gran número de actividades de naturaleza discreta. Diseño complejo.</p> | <p>CPM (<i>Critical Path Method</i> o Método del Camino Crítico) y PERT.</p> |
| <p>Proyectos sencillos de cualquier tipo.</p> | <p>Pocas actividades.</p> | <p>Diagrama de GANTT (o variaciones del mismo).</p> |

Tabla 1. Métodos de planificación idóneos para los diferentes tipos de proyecto

2. ANTECEDENTES

A la hora de encarar la planificación de un **proyecto repetitivo de naturaleza lineal** (o, lo que es lo mismo, un proyecto con una única dirección de crecimiento, a lo largo de la cual se repite la misma secuencia de actividades), es posible hacerlo:

1. **De manera continua.** Una actividad no se inicia hasta que la misma actividad en otro lugar haya terminado. O, lo que es lo mismo, cada cuadrilla de trabajadores se hace cargo de un único paquete de trabajo, consistente en acometer el mismo grupo de tareas en distintas localizaciones.
2. **De manera no continua.** Se acometen las mismas actividades, de manera simultánea, en diferentes puntos del trazado. Lo que requiere disponer de más recursos pero acorta indudablemente los plazos.
3. **De manera mixta.** Dentro del mismo proyecto, hay actividades que se planifican de forma continua y otras de forma discontinua.

El **LSM** permite trabajar de los tres modos ya descritos y además, con él se consigue:

1. La minimización de los sobrecostes.
2. La reducción del plazo de ejecución.
3. La previsión y eliminación de eventuales interferencias espacio-temporales entre las distintas partes interesadas del proyecto.

2.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL LSM

Las técnicas de planificación lineal (dentro de las que se encuentra el LSM, tal y como lo conocemos hoy en día) comenzaron a desarrollarse en los primeros años 60 del siglo XX, aunque se han visto eclipsadas por las metodologías PERT/CPM, de mayor difusión.

Así, **Gorman** (1972) propuso una primera representación gráfica espacio-temporal, donde el progreso de cada actividad se representa como una línea y en la que los **ratios de productividad** de las actividades son las pendientes de dichas líneas. Las **actividades críticas** son aquellas con el ratio de productividad más bajo o bien las que condicionan el inicio de las actividades más lentas o más necesarias para terminar el proyecto.

La influencia de la **asignación de los recursos** empezó a ser considerada en 1974, cuando **Peer** inició el estudio de su influencia sobre las tareas críticas. Sin embargo, no fue hasta 1998 cuando **Mattila y Abraham** detectaron una posibilidad de mejora significativa, consistente en la eventual modificación de la dotación de recursos, según las necesidades del proyecto.

En 1982, **Stradal y Cacha** introdujeron la localización espacio temporal de las diferentes actividades en el diagrama de planificación, lo que aplica tanto a las actividades⁶ propiamente dichas, como a las limitaciones de cualquier tipo (hitos, condicionantes espaciales...). De este modo, la herramienta permitía el control del proyecto “en secciones” y facilitaba el uso optimizado de los recursos.

La faceta gráfica del LSM se vio muy mejorada por **Vorster y Parvin** en 1990, quienes introdujeron símbolos tales como barras, líneas y bloques. Sin embargo, lo cierto es que no llegaban a considerar el LSM como un método de planificación y control, si no como una metodología para la representación gráfica del estado del proyecto en un momento determinado.

De cara a mejorar dicha representación gráfica, pero sin concederle más valor que a la fotografía de un instante del proyecto, **Bafna** incluyó en 1991 el **CMC** (*Crew Movement Chart*) o *Cuadro de Movimientos de Personal*. En él se registra

⁶ Repetitivas o no. En un proyecto de naturaleza lineal, no todas las actividades tienen carácter repetitivo.

qué cuadrilla esta trabajando, el nombre de las personas que la forman, qué están haciendo, dónde y cuándo⁷.

Siguiendo una línea de trabajo completamente diferente, **Harmelik** desarrolló en 1995 un algoritmo que permitiera identificar las **actividades críticas** y, con ellas, el **Camino Crítico** para un proyecto planificado con LSM. Obviamente, este autor sí le daba al LSM entidad de método de control y no sólo de representación gráfica.

Desafortunadamente, el LSM tenía un problema muy importante y era **cómo encarar las actualizaciones**. Al incluir una representación gráfica completa, la aparición de nuevos datos a lo largo del proyecto suponía tener que generar nuevas versiones del diagrama. Así que, mientras no se dispuso del software adecuado, actualizar el diagrama espacio-temporal llevaba mucho tiempo y demandaba muchas horas de trabajo.

Además, simultáneamente, se desarrollaban softwares comerciales de fácil manejo, basados en el diagrama de Gantt y en los métodos CPM/PERT.

Así que, durante los diez años siguientes, no se avanzó demasiado en la mejora del LSM, siendo considerado como un intento fallido (más académico que práctico) de dar solución a la planificación/control de proyectos lineales y continuos.

No es hasta 2011⁸ que sale al mercado un paquete informático (**TILOS**), basado en el LSM y carácter eminentemente práctico. Esta herramienta proporciona al planificador/controlador el “músculo” que necesita para trabajar con el LSM. Así:

1. Toda la información (ratios de trabajo, costes, recursos...) del proyecto está vinculada a un único archivo.
2. Determinar, dibujar y actualizar el camino crítico resulta inmediato.
3. Actualizar el diagrama espacio-tiempo resulta inmediato.
4. La monitorización del proyecto se simplifica.

⁷ Según el nivel de detalle necesario, puede tratarse de meses, semanas, días u horas.

⁸ Aprovechando el gran salto tecnológico que ha tenido lugar en los últimos años.

5. Permite la planificación independiente de subproyectos (no necesariamente lineales⁹) y posterior integración de los mismos en el archivo LSM.
6. Proporciona herramientas de importación/exportación de datos de/a otros softwares de uso común (por ejemplo *Microsoft Project* o *Primavera*).

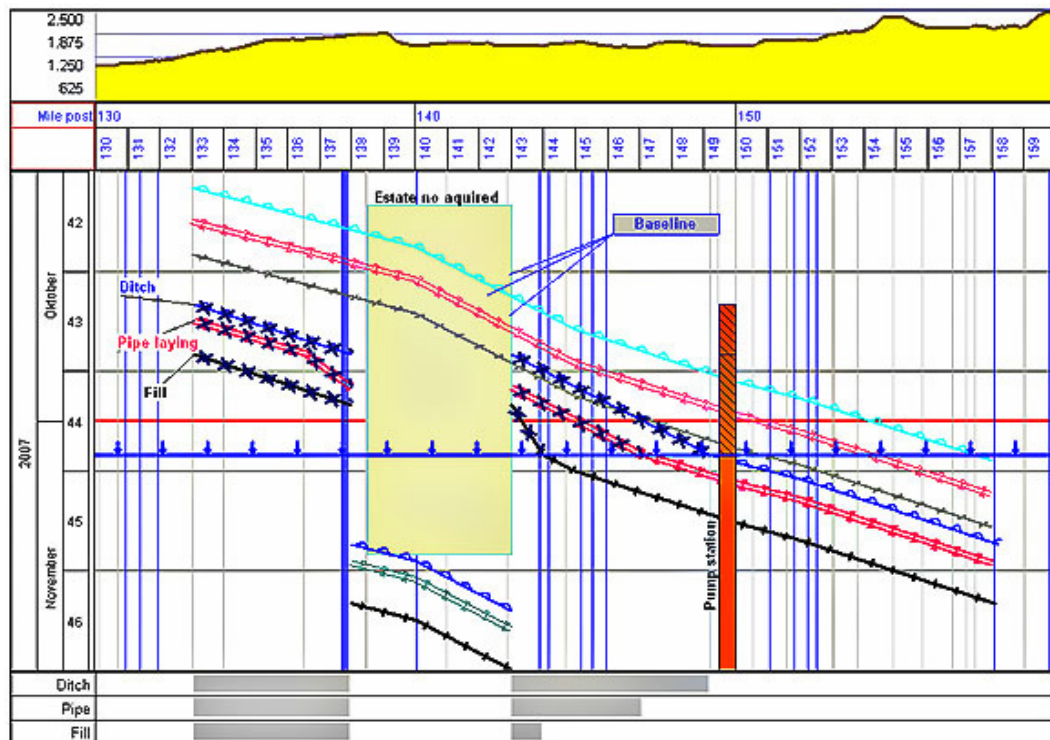


Figura 1. Diagrama LSM para un proyecto de gaseoducto con actualizaciones respecto a la línea base

⁹ Como puede ser un puente, una cimentación, una estación de bombeo...

2.2 DIAGRAMA ESPACIO-TEMPORAL DEL LSM

Es fácil ver diagramas en los que se representa la evolución temporal de cualquier variable. Se emplean con mucha frecuencia y en cualquier disciplina.

Sin embargo, el caso que nos ocupa tiene una dimensión más compleja. Las actividades ocupan sus posiciones relativas respecto a los ejes de las X (distancia) y de las Y (tiempo), lo que permite ver fácilmente, no sólo su localización, si no también su **dirección de avance** y su **tasa de progreso** de manera inmediata.

Además, las diferentes actividades se representan usando **iconos geométricos** cuya ubicación en el diagrama es análoga a su ubicación real en el entorno de trabajo. Esto permite:

1. Una visión global e inmediata de todas las actividades del proyecto en un único diagrama.
2. Una detección visual y sencilla de eventuales conflictos.

2.2.1 EL MARCO DEL DIAGRAMA LSM

Las unidades en las que se definen los dos ejes del diagrama espacio-temporal **LSM** varían según las características del proyecto que se está planificando/controlando. De este modo, pueden ir de cm a km y de minutos a años.

Habitualmente, el eje temporal (o de las Y) se dibuja verticalmente de arriba (principio del proyecto) a abajo (fin del proyecto). En cuanto al eje espacial (o de las X), la definición es más variable y se adapta a la disposición geográfica del proyecto.

Para facilitar la comprensión del diagrama, es frecuente incluir un esquema del perfil del proyecto sobre el eje espacial y vincular a él cualquier información gráfica considerada útil¹⁰. Sobre el eje temporal lo que va normalmente son histogramas de costes y/o recursos.

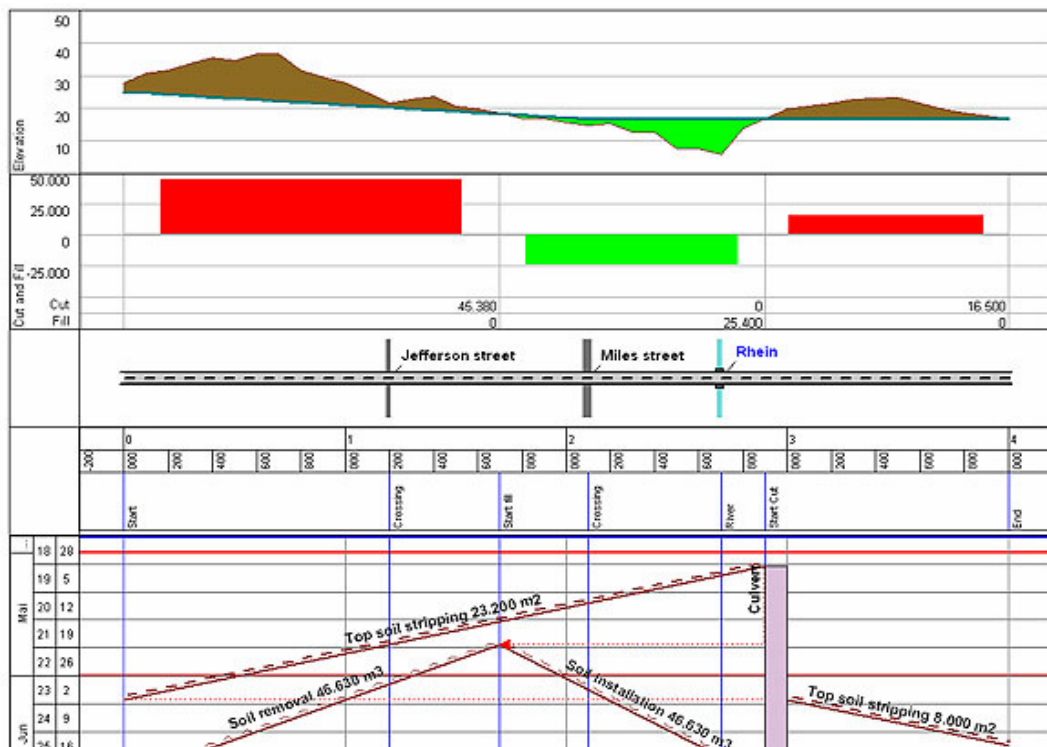


Figura 2. Diagrama LSM para un proyecto de carretera con desmonte y terraplén

¹⁰ Por ejemplo, fotos aéreas, fotos de las secciones, planos de detalle...

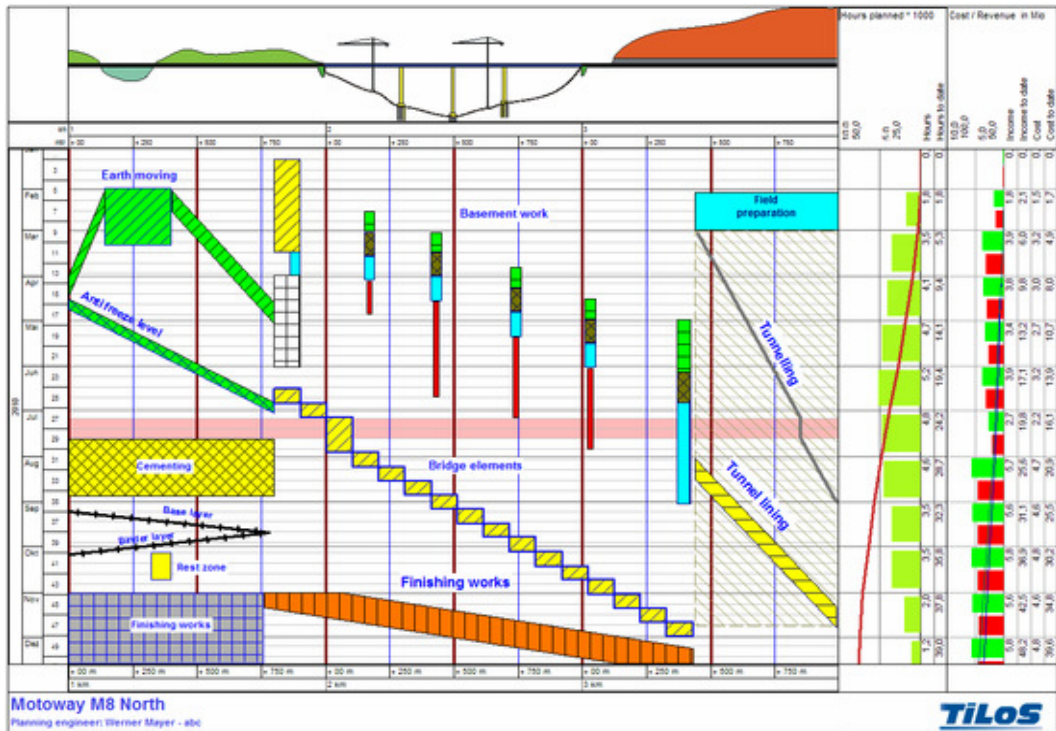


Figura 3. Diagrama LSM para un proyecto de carretera con tramos de desmonte, terraplén, puente y túnel

Con frecuencia, se incluye también una leyenda explicativa de los diferentes iconos, colores y tipos de línea empleados o incluso etiquetas con información adicional.

2.2.2 REPRESENTACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Las representaciones de las diferentes actividades varían según la naturaleza de las mismas. Así:

1. Las **actividades sencillas de carácter lineal**, tales como montaje de cercas o de tuberías se presentan con **líneas**. Dos actividades de este tipo pueden ser completadas por el mismo equipo de trabajo siempre que una de ellas empiece después de que la otra termine y sus representaciones no se corten en ningún momento.

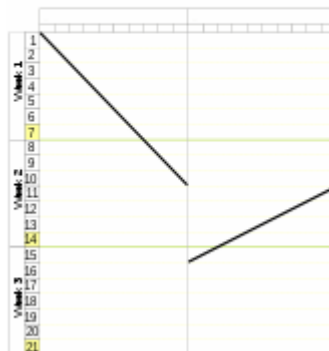


Figura 4. Actividades 1 y 2. Dos actividades de naturaleza lineal, susceptibles de ser llevadas a cabo por el mismo equipo de trabajo

El sentido de avance de los trabajos es de izquierda a derecha en la *Actividad 1* y de derecha a izquierda en la *Actividad 2*.

La pendiente de las líneas muestra la tasa de progreso de las actividades (mayor cuanto más horizontales).

2. Cuando **una actividad dura mucho tiempo**, su representación gráfica es **un rectángulo**, uno de cuyos lados se corresponde con la longitud del espacio de trabajo (dimensión espacial) y otro al tiempo empleado (dimensión temporal). Un ejemplo de este tipo de actividad es la instalación de equipamiento.



Figura 5. Actividad 3. Montaje de equipamiento. Comienza en el km 1+100 y termina en el km 1+300, empieza en el día 2 y dura 14 días

3. Ante **actividades más complejas** (como es el tendido de catenaria), se dibuja **un paralelogramo** en el que se muestra durante cuanto tiempo la sección de referencia (en el caso de la catenaria, un tramo de la vía del tren) estará ocupada por la cuadrilla correspondiente.

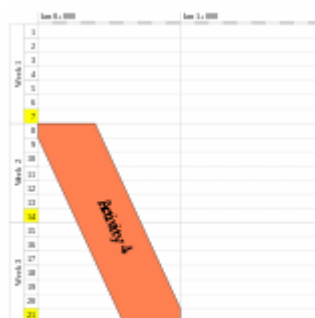


Figura 6. Actividad 4. Tendido de catenaria, con inicio el día 8 y fin el día 21. Cada día el equipo de trabajo ocupará 300 m de vía

4. Las actividades que **ocupan una distancia constante durante un periodo de trabajo específico** se representan como **una escalera**. Ejemplos de este tipo de actividad son el asfaltado de carreteras por tramos o el tendido de líneas eléctricas entre torres situadas a una distancia constante.

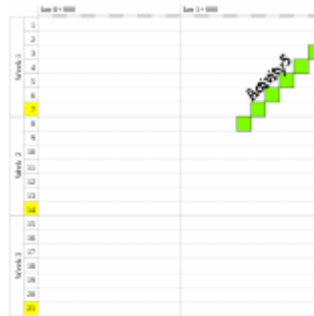


Figura 7. Actividad 5. Asfaltado de carretera, que comienza en el km 1+900, termina en el km 2+000 y precisa de un día antes de que el equipo se desplace a la siguiente sección (km 1+800, 1+900)

5. Cuando el progreso de una actividad se ve afectado por circunstancias del entorno que hacen que **deje de ser lineal** (por ejemplo, encontrarse con un tipo de suelo distinto al que esperaba), su representación tendrá un aspecto más “irregular”. Así, una mayor dificultad se traduce en una tasa de ejecución menor y ésta, a su vez, en una mayor pendiente. Si esa tasa de ejecución deja de ser constante, la pendiente será variable, dando lugar a una representación en curva.

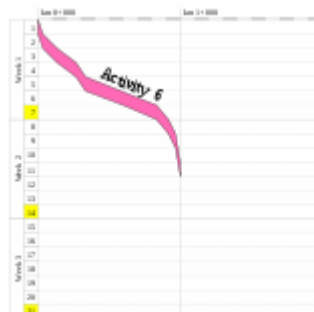


Figura 8. Actividad 6. Actividad no lineal

6. Y, finalmente, todas las actividades pueden verse afectadas por variaciones en el ritmo de trabajo como son los turnos, las vacaciones, o cualquier otra parada. Dado que el tiempo avanza sin que el trabajo lo haga, las interrupciones aparecen representadas con un escalón.

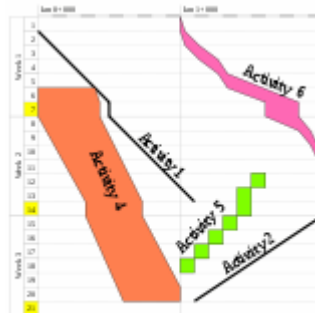


Figura 9. Actividades varias que han sufrido interrupciones

2.2.3 LSM vs CPM/PERT. SIMILITUDES Y DISCREPANCIAS.

A la hora de establecer una planificación con **LSM**, se trabaja siguiendo una secuencia semejante a la que se emplea con **CPM/PERT**, aunque, obviamente, existen diferencias, debido a la distinta naturaleza de ambas metodologías. Así, en ambos casos:

1. Lo primero que hay que hacer es **descomponer el proyecto en actividades y establecer las relaciones entre ellas.**
2. A continuación, hay que **estimar las duraciones de las actividades y representarlas gráficamente.**

Los criterios para hacer dicha estimación deberán ser análogos, ya se vaya a planificar con CPM/PERT o con LSM. De otro modo, los resultados de cualquier análisis comparativo resultarían inválidos.

En lo que a la **representación gráfica** se refiere, la de las metodologías CPM/PERT es un diagrama en red y la del LSM, es un diagrama espacio-temporal. Ésta última no sólo proporciona información de las

relaciones entre actividades y su localización espacial, si no que resuelve situaciones tales como:

- **Los desplazamientos entre dos actividades** (es decir, cuando, para que una tarea empiece es necesario que pase un cierto tiempo desde el fin de la tarea predecesora).

Con el LSM, basta con situar los iconos de las dos actividades sobre el eje temporal, con una separación igual al retraso deseado. Por el contrario, en un diagrama de red tipo PERT, sería necesario incorporar una tarea ficticia.

- **Los solapamientos entre dos actividades** (que tienen lugar cuando es posible llevar a cabo más de una tarea a la vez).

Sobre un diagrama LSM, lo resolvemos dibujando los iconos de las distintas tareas con la misma coordenada temporal (aunque no necesariamente tienen que tener la misma coordenada espacial). Para resolverlo con un diagrama de red tipo PERT, habría que partir la tarea predecesora en otras dos: una desde el momento inicial hasta que empieza la tarea sucesora y otra, desde este punto hasta el final de la tarea predecesora.

3. Y, finalmente, hay que **determinar la duración del proyecto**.

El cálculo con la metodología PERT implica la aplicación de un algoritmo para establecer las fechas de inicio y de fin del conjunto de las actividades y determinar el *Camino Crítico*.

Por el contrario, con el LSM, la duración del proyecto es un dato “inmediato”, que se lee sobre el eje Y del diagrama espacio-temporal.

3. REVISIÓN DEL “ESTADO DEL ARTE”

A lo largo de los últimos años se han seguido diferentes líneas de investigación en el ámbito de la planificación de proyectos de naturaleza lineal y continua. Así:

Se ha “cerrado el objetivo”, **centrándose en un sector/tipo de proyecto en particular**. Ejemplo de ello son los proyectos de suministro de aguas y saneamiento con tendido de múltiples tuberías, cada una de ellas con funciones diferentes (*Aiyin Jiang y Bin Cheng, 2006*). También lo son los proyectos de construcción de túneles (*Weihong Gu y R. Zhao, 2010*), de carreteras, de líneas de tren...

Por otra parte, se ha trabajado en el **análisis comparativo de diferentes métodos de planificación y control**, detectando puntos fuertes y débiles de cada uno de ellos y buscando oportunidades de mejora. Dicha comparación puede hacerse entre metodologías de control de naturaleza muy distinta: CPM vs LSM (*René A. Yamín y David J. Harmelink, 2002*), o de naturaleza más semejante: LSM vs LOB (*Kris G. Mattila y Amy Park, 2003*)

En un orden más práctico y operativo de las cosas, se ha buscado cómo **traspasar información de un método de naturaleza lineal (LSM) a otro más tradicional (CPM/PERT)**¹¹ (*Douglas D. Gransberg, 2007*). Y cómo minimizar **los sobrecostos y los retrasos** en proyectos lineales continuos, planificados y controlados con LSM (*Jae-SeobLee, 2007* y *Carla López del Puerto y Douglas D. Gransberg, 2008*)

Y, en una vertiente más académica, se han desarrollado algoritmos matemáticos para incluir el **concepto de productividad** en el LSM (*Gunnar Lucko, 2008*).

¹¹ De cara a satisfacer una eventual demanda por parte del cliente o de los subcontratistas.

Finalmente, las tendencias más recientes pasan por considerar la planificación del proyecto como la piedra angular de la **cadena de suministro** del producto final ¹²(Kenn Steger-Jensen y Col, 2011).

4. APLICACIÓN DEL LSM A PROYECTOS LINEALES DE TENDIDOS DE LÍNEAS ELÉCTRICAS

El objetivo de este estudio es el análisis del **LSM** (*Linear Schedule Method*), como la técnica de planificación mejor adaptada a los Proyectos de Naturaleza Lineal y Repetitiva. Y la comparación de los resultados obtenidos con ella, frente a los que se obtienen del empleo de otros métodos más ampliamente difundidos, como **CPM/PERT**.

La evaluación de:

1. Los métodos de planificación más adecuados para obtener el *Plan De Proyecto* de Proyectos Lineales y Repetitivos.
2. Las posibilidades de aplicación de técnicas de seguimiento y control, basadas en el *Método de Valor Ganado* durante el desarrollo de los mismos.

se aborda mediante el **Estudio de Casos**.

El presente documento gira alrededor de un proyecto de referencia: el **tendido de una línea eléctrica**. Tanto los objetivos formulados, como las consideraciones que se hagan o las conclusiones a las que se llegue, estarán en el entorno del mismo.

¹² Entendiendo como tal el proyecto terminado, aceptado y entregado.

4.1 DESCRIPCIÓN

A la hora de planificar nuestro proyecto, se da una situación ambivalente. Su naturaleza lineal hace que el método más adecuado sea el **LSM** pero, al tratarse de un proyecto sencillo (con pocas tareas diferentes), podría emplearse también un diagrama de **GANTT**.

Dada la diferente naturaleza de ambos métodos de planificación, para el cálculo de los *Caminos Críticos* habrá que usar también algoritmos diferentes (**PERT** si se planifica con **GANTT** y **KLRPM** si se planifica con **LSM**).

Los resultados obtenidos no tienen por qué ser iguales. Y, como consecuencia directa, tampoco tiene por qué serlo el plazo de ejecución.

4.2 FORMULACIÓN

El objetivo principal del estudio es determinar la forma en la que se verán afectados el Plazo de Ejecución y el trazado del Camino Crítico en un proyecto de naturaleza lineal, en función del método de planificación empleado.

4.3 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

1. **Comparar los resultados obtenidos con (LSM/KLRPM) respecto a otro método convencional (GANTT/PERT), para el cálculo del Camino Crítico y la duración de un proyecto tipo “línea eléctrica”.**
2. **Analizar las posibilidades de incorporar al LSM técnicas de seguimiento integrado de costes y plazos, del tipo Valor Ganado, definiendo los indicadores más adecuados en el contexto del proyecto de trabajo.**

4.4 PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

El empleo de diferente metodología de planificación/determinación del *Camino Crítico* (**LSM/KLRPM** o **GANTT/PERT**) no afectará a los resultados del proyecto objeto de estudio.

Será posible adaptar los métodos de control, basados en la obtención de indicadores de rendimiento, plazo y coste, a la planificación con **LSM**.

5. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La resolución del *Problema de Investigación* se particulariza para el caso de un proyecto lineal repetitivo sencillo.

Para ensayar y evaluar los resultados de planificar según el método **LSM**, se aprovecharán los recursos del programa **TILOS**.

Dicho programa es de reciente creación (salió al mercado en el año 2011) y, a día de hoy, es el único software comercial pensado para satisfacer las necesidades específicas de planificación de los proyectos de naturaleza lineal¹³.

Para ello, emplea el método **LSM**, revalorizándolo significativamente¹⁴. Pero, además, **TILOS** permite la inclusión de actividades (e incluso subproyectos) no lineales en los archivos **LSM**. También facilita la importación/exportación de datos de/a otros softwares de uso común y la asignación/pre-tratamiento de los recursos necesarios para acometer el proyecto.

¹³ Ver **Apartado 2.1**.

¹⁴ Antes de disponer del software adecuado, planificar con **LSM** resultaba poco operativo.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto objeto de este trabajo es la **construcción de un pequeño tramo de una línea eléctrica**. Se pretende que sea lo más heterogéneo posible, de manera que se incluyan una serie de elementos singulares, algunos de los cuales son repetitivos y otros no. A saber:

1. **Tres torres eléctricas**¹⁵. Su construcción incluye *una fase de obra civil* (excavación, pilotaje, hormigonado...) y otra de *montaje mecánico* (transporte de componentes, ensamblaje, roblonado y/o soldadura).

Cada una de las fases descritas será completada por una única cuadrilla (de operadores civiles y montadores, respectivamente). De este modo, hasta que no se completen los trabajos en el emplazamiento de una torre, no empezarán en el de la siguiente.

Además, una vez terminados los trabajos civiles de una torre, será necesario considerar un periodo de tiempo “de secado”, antes de comenzar con el montaje mecánico.

2. **Un centro de transformación**. Se trata de un elemento singular cuya construcción no es necesario supervisar, por haberla dejado en manos de una empresa externa que proporciona servicios “llave en mano”.
3. **Tendido de cable aéreo**¹⁶ entre las tres torres.
4. **Tendido de cable superficial**¹⁷ entre la línea aérea y el centro de transformación.

No comienza hasta haber terminado la actividad anterior, para que la misma cuadrilla pueda acometer ambas.

¹⁵ Elementos repetitivos.

¹⁶ Elemento lineal.

¹⁷ Elemento lineal.

5. **Conexión, commissioning y pruebas.** Esta última actividad tiene carácter lineal, por llevarse a cabo a lo largo de la totalidad de la línea eléctrica (tanto la aérea como la superficial). Debe ser desarrollada por un equipo eléctrico especializado, distinto de las cuadrillas encargadas de tender el cable.

La **Tabla 2** recoge la información básica del proyecto, entendiendo como tal las **relaciones entre actividades** y la **duración de las mismas**. A continuación, se procede a hacer una serie de consideraciones al respecto:

1. **Actividades semejantes tienen duraciones distintas** (concretamente, en el caso de las que son repetitivas). De este modo, se reflejan los distintos grados de dificultad que hay que afrontar en cada una de ellas.

Así, los trabajos civiles de las tres torres¹⁸ tienen duraciones de 16, 13 y 13 días respectivamente. Los recursos empleados son los mismos en los tres casos pero lleva más tiempo construir las cimentaciones de la *Torre 1*, por tratarse de una zona pantanosa.

Del mismo modo, el montaje mecánico de la *Torre 1* dura 10 días y los de las *Torres 2 y 3*, 13 días. Los recursos vuelven a ser los mismos¹⁹ pero la zona de acopios está junto a la *Torre 1* y se dispone del material, precortado y clasificado, a pie de tajo.

La duración de las tareas de transporte y preparación del material se estima en torno a 3 días, para las *Torres 2 y 3*.

2. Las **esperas por secado de hormigón** se convierten en tres tareas ficticias (F1, F2 y F3), que no consumen recursos y tienen una duración de cinco días. El concepto de tarea ficticia sólo tiene sentido si se trabaja con PERT: con LSM las esperas se tratan como un *buffer* de duración fija.

¹⁸ Iguales entre sí.

¹⁹ Misma cuadrilla y misma apartamentada.

3. El proyecto se planifica a partir de un calendario de trabajo de 5 días/semana y 8 h/día. Así que las duraciones de las tareas son de “trabajo efectivo” o, lo que es lo mismo, se miden en **días laborables**.

4. El **código de colores** representa la diferente naturaleza de las distintas actividades. Así, las tareas ficticias aparecen en rojo, la única tarea subcontratada, en azul, las de naturaleza repetitiva, en verde y las lineales, en negro.

| ACTIVIDADES | | PREDECESORAS | DURACIÓN (días laborables) |
|---------------|---|--------------|-------------------------------|
| <u>CÓDIGO</u> | <u>DESCRIPCIÓN</u> | | |
| A | Trabajos Civiles Torre 1 | - | 16 |
| F1 | Espera por Secado de Hormigón Torre 1 | A | 5 |
| B | Trabajos Mecánicos Torre 1 | F1 | 10 |
| C | Trabajos Civiles Torre 2 | A | 13 |
| F2 | Espera por Secado de Hormigón Torre 2 | C | 5 |
| D | Trabajos Mecánicos Torre 2 | F2, B | 13 |
| E | Trabajos Civiles Torre 3 | C | 13 |
| F3 | Espera por Secado de Hormigón Torre 3 | E | 5 |
| F | Trabajos Mecánicos Torre 3 | F3, D | 13 |
| G | Construcción Centro de Transformación por empresa externa (llave en mano) | - | 43 |
| H | Tendido de cable aéreo | F | 6 |
| I | Tendido de cable superficial | H | 5 |
| J | Conexión, Commissioning y Pruebas | I, G | 15 |

Tabla 2. Información básica del proyecto

5.2 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO CON GANTT y LSM. IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMINOS CRÍTICOS CON PERT y KRLPM

Con la información desplegada en el apartado 5.1, ya es posible proceder con la planificación del proyecto. Para ello, hay dos metodologías posibles: **un diagrama de Gantt²⁰ y un diagrama espacio-temporal LSM²¹.**

La siguiente fase pasa por identificar el *Camino Crítico* y, con él, la duración del proyecto.

Para ello se emplean el **método PERT²²** y el **algoritmo KRLPM**. Este último es mucho menos conocido y está mucho menos perfeccionado. Además, está vinculado exclusivamente al diagrama espacio-temporal **LSM²³**

5.2.1 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

El uso del diagrama de Gantt para planificar proyectos lineales sólo tiene sentido si estos son muy sencillos (como es el caso que nos ocupa). De otro modo, tendríamos diagramas muy farragosos y poco útiles, en los que la sucesión de tareas repetitivas sólo aportaría confusión y en los que las actividades lineales no recibirían ningún tratamiento específico.

En cualquier caso, en la **Figura 10** se recoge el diagrama de Gantt del proyecto. Proporciona una buena imagen de las relaciones entre actividades pero, a excepción del calendario temporal, aporta la misma información que la **Tabla 2**.

²⁰ Ver **Figura 10**.

²¹ Ver **Figura 11**.

²² Ver **Figura 12**.

²³ Ver **Figura 13**.

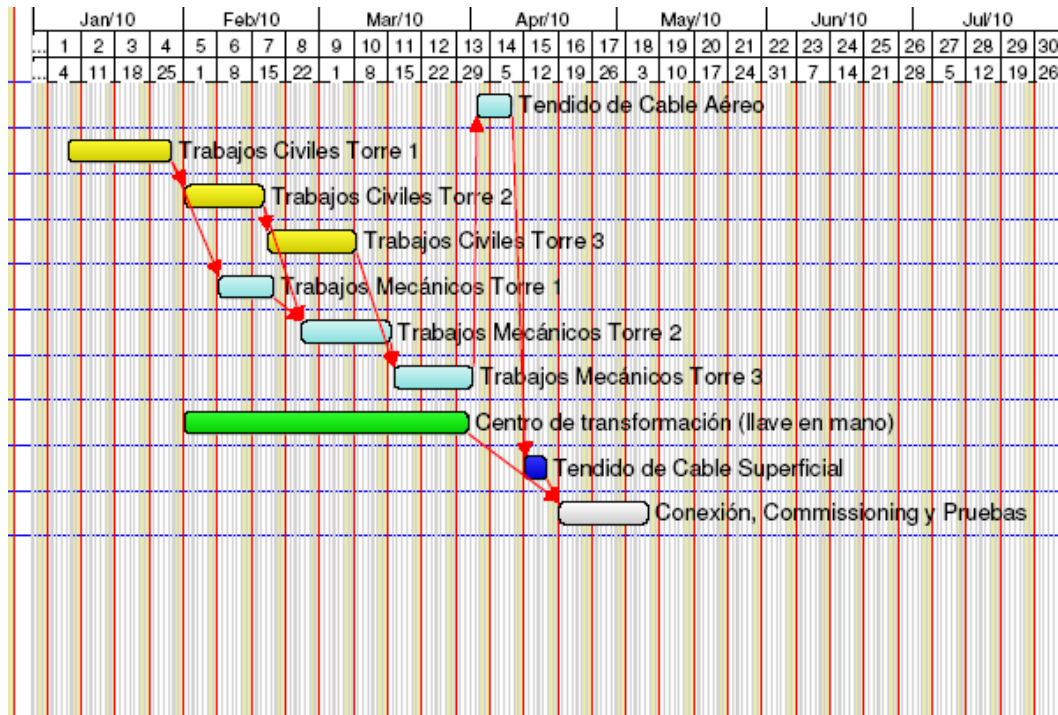


Figura 10. Planificación del proyecto con Diagrama de Gantt

Por el contrario, el LSM ha sido desarrollado para planificar proyectos lineales. La **Figura 11** recoge el diagrama espacio-temporal del proyecto y de un único vistazo es posible saber:

- 1.Cuál es la **naturaleza de las diferentes actividades**, según los iconos que las representan. Así: **H, I y J²⁴** son lineales, **A, C y E y B, D y F** son repetitivas y **G** es singular.
2. Cuáles son las **relaciones entre actividades**, representadas con flechas rojas.
3. Las **ubicaciones espacial y temporal** de cada actividad. No es necesario incorporar actividades ficticias para representar una espera: basta con separar las actividades predecesora y sucesora el tiempo deseado sobre el eje temporal (5 días en el caso de las *Esperas por Secado de Hormigón*).

²⁴ Ver código de la **Tabla 2**.

4. El **sentido de avance** de las diferentes actividades. Esto es especialmente importante en el caso de las actividades lineales.

Así, las actividades **H, I y J** se desarrollan de derecha a izquierda (o de oeste a este, si se asume que la disposición del diagrama espacio-temporal LSM es la cartográfica).

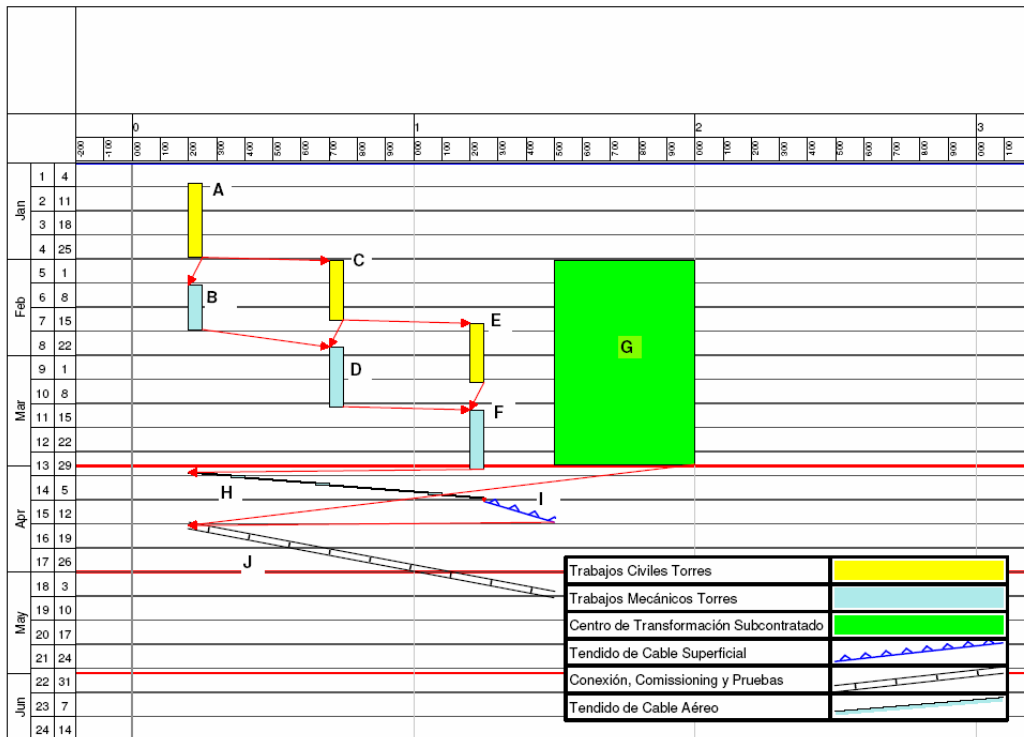


Figura 11. Planificación del proyecto con LSM. Diagrama espacio-temporal

5.2.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMINOS CRÍTICOS

Para identificar el Camino Crítico de nuestro proyecto y, con él, la duración del mismo, se trabaja en dos direcciones simultáneas:

1. Dibujando un diagrama de red y aplicando al mismo el algoritmo PERT.
2. Dibujando un diagrama espacio-temporal y aplicando al mismo el algoritmo KLRPM.

CAMINO CRÍTICO CON MÉTODO PERT

El diagrama en red PERT se recoge en la **Figura 12**. Se trata de una metodología tan conocida que no precisa de ulterior aclaración.

El código y la duración de las distintas actividades²⁵ están escritos sobre las flechas. Las flechas discontinuas señalan las actividades ficticias y el *Camino Crítico* está coloreado en verde.

En conclusión, el *Camino Crítico* calculado con PERT está formado por la siguiente secuencia de actividades: **A, C, F2, E, D, F3, F, H, I y J** y la duración del proyecto es de **86 días laborables**.

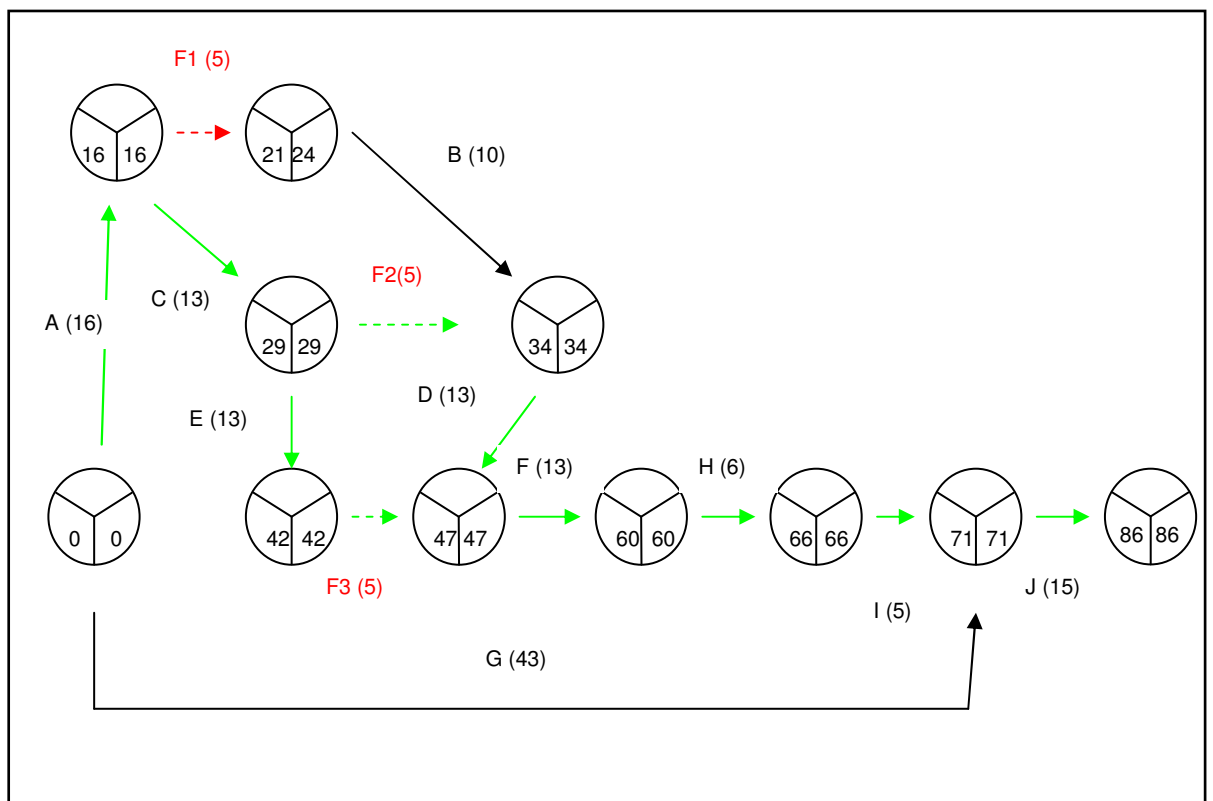


Figura 12. Cálculo del Camino Crítico con Diagrama PERT

²⁵ Ver **Tabla 2**.

CAMINO CRÍTICO CON KLRPM

El algoritmo **KLRPM** se emplea para calcular el *Camino Crítico* en proyectos de naturaleza lineal y continua. Y está basado en una representación espacio-temporal como la del **LSM**.

Aunque se mantiene el concepto de relación entre tareas (propia del **PERT**), se introduce también el de **limitaciones**. Las limitaciones temporales equivalen a los *buffers* entre dos actividades y las limitaciones espaciales al espacio real que separa los emplazamientos de las mismas.

KRLPM sitúa las actividades que conforman el proyecto en un diagrama espacio-temporal, donde el tiempo es la coordenada Y, y el espacio la coordenada X²⁶. Dichas actividades deberán estar lo más cerca posible unas de otras, manteniendo las limitaciones espacio-temporales del proyecto.

El método consta de dos partes:

1. Identificación de la **Secuencia Crítica de Actividades**.

Para ello, se comienza por la última actividad del proyecto y se la sigue de fin a comienzo. Se procede de la misma manera con sus predecesoras, a través de las relaciones entre actividades, hasta llegar a la actividad de inicio. De este modo, se localiza el camino más largo del proyecto y la *Secuencia Crítica de Actividades*.

En el caso que nos ocupa, la *Secuencia Crítica* está formada por las actividades **A, B, C, D, E, F, H, I y J**. La actividad **G** (Construcción de Centro de Transformación) no forma parte de la misma, ya que no conduce a la actividad de inicio.

²⁶ Ver **Figura 13**.

2. Cálculo del **Camino Crítico**.

Para calcular el *Camino Crítico*, se parte de la *Secuencia Crítica*.

Se coge la última actividad y se la sigue de fin a comienzo, hasta que se alcance el punto en el que la relación con su tarea predecesora imponga alguna **limitación** (ya sea espacial o temporal).

En ese momento, hay que “saltar” a la tarea predecesora teniendo en cuenta la **limitación** existente. Y dicho salto puede ser:

- a. Horizontal, en el caso de que la limitación sea espacial.
- b. Vertical, en el caso de que sea temporal.

Se continúa de la misma forma hasta llegar al comienzo de la actividad de inicio.

Si en una actividad, las limitaciones que proporcionan las relaciones con sus tareas predecesora y sucesora no son buffers temporales, entonces, la parte de la actividad que queda entre las dos limitaciones se llama *Segmento Crítico*.

El *Camino Crítico* está formado por:

- a. **Actividades con Segmentos Críticos que pertenecen a la Secuencia Crítica.**

En nuestro proyecto, se trata de las actividades **D, F, H, I y J**.

- b. **Actividades con un único Punto Crítico.** Las dos actividades (sucesora y predecesora) imponen sus limitaciones en un único punto. Si dicho punto coincide con el inicio o el fin de la actividad, ésta podría desarrollarse más rápidamente o más lentamente que

lo planificado inicialmente, ya que su única limitación son las fechas de inicio o de fin.

Nuestro proyecto tiene una actividad con un único *Punto Crítico*: se trata de la actividad de inicio **A** (*Trabajos Civiles Torre 1*).

Como conclusión, el *Camino Crítico* calculado según el algoritmo **KLRPM** aparece en la **Figura 13**, coloreado en verde. Lo forman las actividades **A, D, F, H, I y J**.

Los “saltos” entre las tareas del *Camino Crítico* (en este proyecto, siempre horizontales, por tratarse de limitaciones espaciales) también aparecen coloreados en verde.

Para conocer la duración del proyecto, es suficiente con leerla sobre el eje temporal. En este caso, se obtiene el mismo resultado que con el PERT: **86 días laborables**.

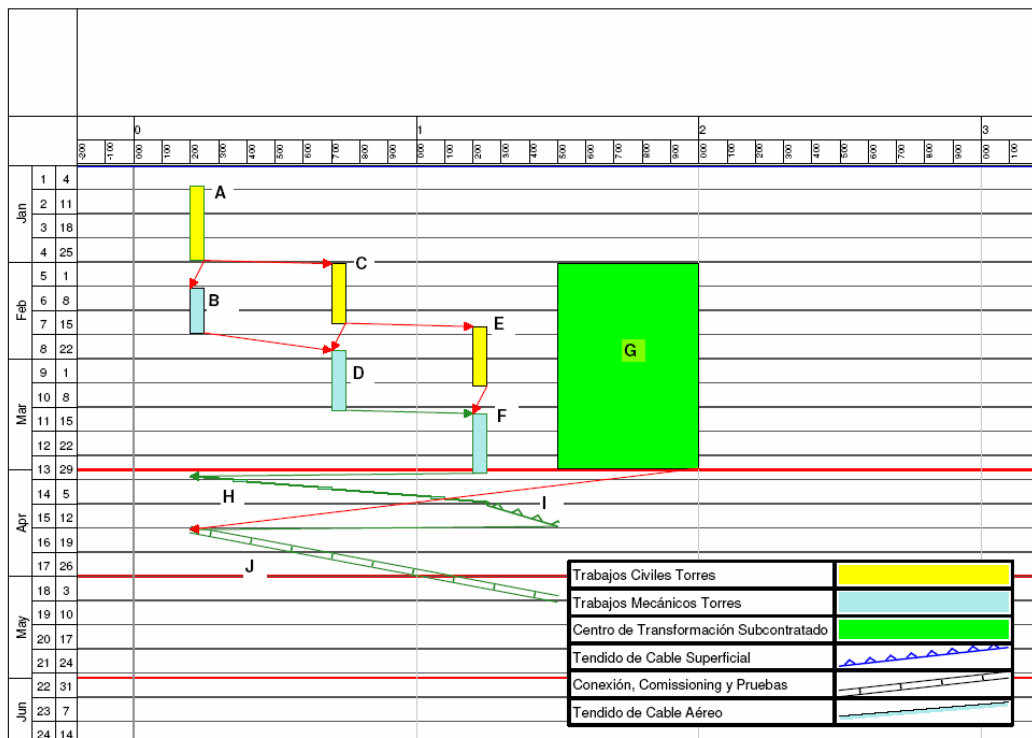


Figura 13. Camino Crítico sobre diagrama espacio-temporal. Cálculo con KLRPM

5.3 CONTROL DEL PROYECTO MEDIANTE EL MÉTODO DEL VALOR GANADO

Una vez superada la fase de *Planificación Inicial*, los proyectos entran en la *Fase de Ejecución*.

Si durante la *Fase de Ejecución* se siguiera la *Planificación Inicial* de manera rigurosa, no habría necesidad de control posterior, pero, desafortunadamente, raro es el proyecto en el cual no tienen lugar situaciones imprevistas, que se traducen en retrasos y sobrecostos. Ante esto, se impone la necesidad de llevar un control exhaustivo, que permita a la Dirección de Proyecto tomar, lo antes posible, las medidas correctoras que resulten oportunas en cada caso.

En el caso que nos ocupa, se emplea la *Metodología de Planificación LSM* y el *Método de Control del Valor Ganado*.

El proceso de control se lleva a cabo desde la perspectiva de **la propiedad**. Así, se controlará el avance de la **empresa contratista** a partir de sus planificaciones actualizadas y de sus certificaciones mensuales.

Dicha **empresa contratista** sólo aporta el personal y la maquinaria, haciéndose cargo la propiedad del suministro de acopios y consumibles. Por otro lado, la **empresa contratista**, subcontrata a su vez la construcción del Centro de Transformación como un “llave en mano”.

5.3.1 DESCRIPCIÓN DEL AVANCE DEL PROYECTO

Para seguir la evolución del proyecto completo se procede a analizarlo en dos momentos: la **primera piedra** y el **hito de cierre**.

Cuando se pone la **primera piedra**, tenemos una planificación inicial y una asignación de recursos a las diferentes actividades, lo que se traduce (una vez

aplicado el *Beneficio Industrial* correspondiente²⁷), en un calendario de facturación.

Por el contrario, en el **hito de cierre**, se cuenta con el histórico de las planificaciones y con las certificaciones emitidas por la empresa contratista a lo largo de todo el proyecto.

En el caso que nos ocupa, la información se recoge de las siguientes fuentes. Así:

PRIMERA PIEDRA:

1. La *Planificación Inicial* está recogida en la **Figura 14**.
2. Se han asignado a las distintas actividades los recursos necesarios para llevarlas a cabo²⁸.
3. El programa **TILOS** nos permite incluir la información sobre recursos en el mismo archivo y nos devuelve un **Histograma de Costes**. Con él obtenemos una visión gráfica sencilla de los costes mensuales, divididos por *Centros de Coste*.
4. Sólo se trabaja con tres **Centros de Coste**: Mano de Obra²⁹, Maquinaria³⁰ y Centro de Transformación³¹.
5. La construcción del Centro de Transformación es un “llave en mano”. Sus costes se asocian al avance del trabajo, sean cuales sean las condiciones de pago acordadas entre el contratista principal y la empresa subcontratista.

²⁷ En este caso, un 6%.

²⁸ Ver **Tabla 3**.

²⁹ Rojo en el Histograma de la **Figura 14**.

³⁰ Verde en el Histograma de la **Figura 14**.

³¹ Azul en el Histograma de la **Figura 14**.

6. La **Tabla 4** recoge la *Planificación Inicial de Costes*. Se trata de los mismos datos que aparecen representados gráficamente en el *Histograma de Costes*.
7. La **Tabla 5** recoge la *Planificación Inicial de Certificaciones*. Se trata de los datos de la **Tabla 4**, corregidos en un 6% de *Beneficio Industrial*.

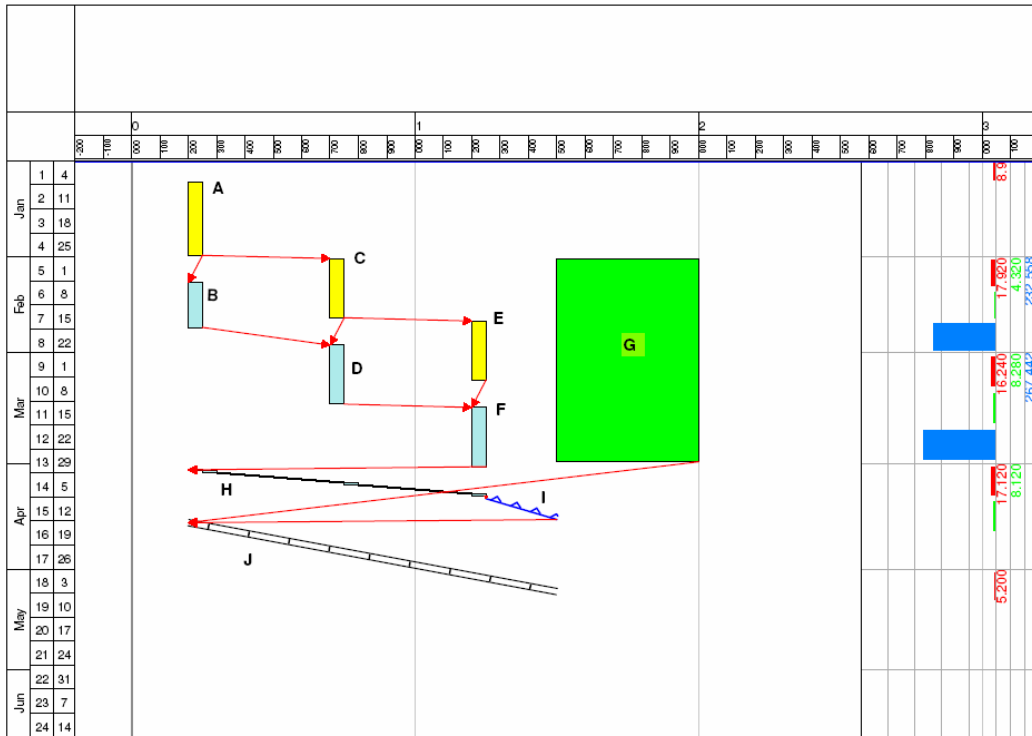


Figura 14. Planificación Inicial del Proyecto. Diagrama espacio-temporal LSM con histograma de costes

| TAREAS | | DURACIÓN (días laborables) | RECURSOS |
|--------|--|----------------------------|--|
| Código | Descripción | | |
| A | Trabajos Civiles Torre 1 | 16 | Cuadrilla trabajos civiles (Especialista y Ayudante) Excavadora Camión |
| B | Trabajos Mecánicos Torre 1 | 10 | Cuadrilla montadores mecánicos (Operador y Ayudante) Camión |
| C | Trabajos Civiles Torre 2 | 13 | Cuadrilla trabajos civiles (Especialista y Ayudante) Excavadora Camión |
| D | Trabajos Mecánicos Torre 2 | 13 | Cuadrilla montadores mecánicos (Operador y Ayudante) Camión |
| E | Trabajos Civiles Torre 3 | 13 | Cuadrilla trabajos civiles (Especialista y Ayudante) Excavadora Camión |
| F | Trabajos Mecánicos Torre 3 | 13 | Cuadrilla montadores mecánicos (Operador y Ayudante) Camión |
| G | Centro de Transformación (llave en mano) | 43 | Empresa Externa |
| H | Tendido de cable aéreo | 6 | Cuadrilla montadores eléctricos (Operador, Ayudante y Especialista en Tendido de Cable) Camión Unidad Cargadora de Cable |
| I | Tendido de cable superficial | 5 | Cuadrilla montadores eléctricos (Operador, Ayudante y Especialista en Tendido de Cable) Máquina para abrir zanjas |
| J | Conexión, Commissioning y Pruebas | 15 | Grupo eléctrico especializado (Operador, Especialista y Jefe de Equipo) |

Tabla 3. Duración de Tareas y Recursos del Proyecto. Planificación inicial

| PLANIFICACIÓN INICIAL | | | |
|-----------------------|--------------|------------------|--------------------------|
| Fecha | Mano de Obra | Máquinas | Centro de Transformación |
| ENERO | 8,960 € | | |
| FEBRERO | 17,920 € | 4,320 € | 232,558 € |
| MARZO | 16,240 € | 8,280 € | 267,442 € |
| ABRIL | 17,120 € | 8,120 € | |
| MAYO | 520 € | | |
| TOTAL | 60,760 € | 20,720 € | 500,000 € |
| TOTAL PROYECTO | | 581,480 € | |

Tabla 4. Calendario de Costes según la Planificación Inicial

| PLANIFICACIÓN INICIAL | | | |
|-----------------------|--------------|------------------|--------------------------|
| Fecha | Mano de Obra | Máquinas | Centro de Transformación |
| ENERO | 9,498 € | | |
| FEBRERO | 18,995 € | 4,579 € | 246,511 € |
| MARZO | 17,214 € | 8,777 € | 283,489 € |
| ABRIL | 18,147 € | 8,607 € | |
| MAYO | 551 € | | |
| TOTAL | 64,406 € | 21,963 € | 530,000 € |
| TOTAL PROYECTO | | 616,369 € | |

Tabla 5. Calendario de Facturación según Planificación Inicial

HITO DE CIERRE:

1. La *Ejecución Real* del Proyecto está recogida en la **Figura 15**.
2. La actividad **A** (*Trabajos Civiles Torre 1*) no comienza hasta una semana después de la fecha de inicio de proyecto y la actividad **H** (*Tendido de Cable Aéreo*) sufre un retraso de 5 días laborables respecto a la fecha de fin de su predecesora: **F** (*Trabajos Mecánicos Torre 3*). Dado que ambas tareas forman parte del *Camino Crítico* (sea cual sea la manera de calcularlo), la duración del proyecto aumenta.

3. Buscando corregir dicho efecto no deseado, se incrementa la asignación de recursos de la última actividad **J** (*Conexión, Commissioning y Pruebas*), de manera que su duración pase de 15 a 10 días laborables³².
4. La construcción del Centro de Transformación no se inicia hasta el 15/02, cuando se había planificado para comenzar el 01/02. Pero, afortunadamente, esta tarea no pertenece al *Camino Crítico* del proyecto, así que la duración del mismo no se ve afectada.

En otro orden de las cosas, sus costes siguen calculándose sobre el porcentaje completado.

5. Las consideraciones sobre **Histograma** y **Centros de Coste** son análogas a las que se hicieron para la **primera piedra**.
6. La **Tabla 7** recoge el *Calendario de Costes según Ejecución Real*. Se trata de los mismos datos que aparecen representados gráficamente en el *Histograma de Costes* de la **Figura 5**.
7. La **Tabla 8** recoge el *Calendario de Certificaciones según Ejecución Real*. Se trata de los datos de la **Tabla 7**, corregidos en un 6% de *Beneficio Industrial*.

³² Ver **Tabla 6**. La tarea J está en azul.

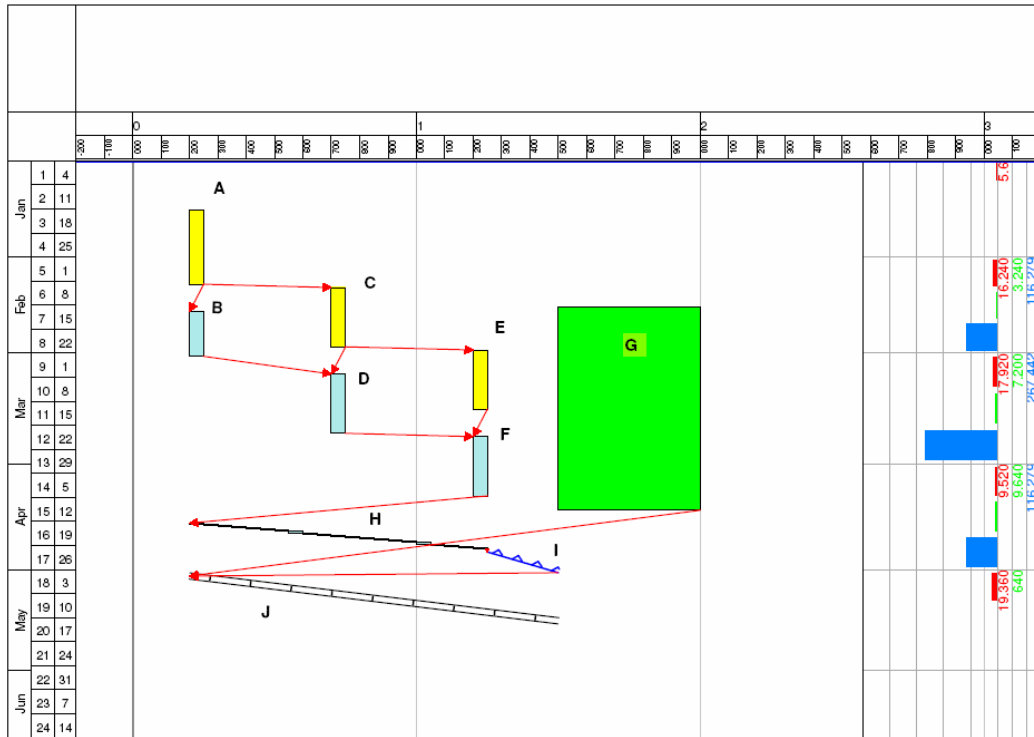


Figura 15. Planificación correspondiente a la Ejecución Real del Proyecto.

Diagrama espacio-temporal LSM con histograma de costes

| TAREAS | | DURACIÓN (días laborables) | RECURSOS |
|--------|--|----------------------------|--|
| Código | Descripción | | |
| A | Trabajos Civiles Torre 1 | 16 | Cuadrilla trabajos civiles (Especialista y Ayudante) Excavadora Camión |
| B | Trabajos Mecánicos Torre 1 | 10 | Cuadrilla montadores mecánicos (Operador y Ayudante) Camión |
| C | Trabajos Civiles Torre 2 | 13 | Cuadrilla trabajos civiles (Especialista y Ayudante) Excavadora Camión |
| D | Trabajos Mecánicos Torre 2 | 13 | Cuadrilla montadores mecánicos (Operador y Ayudante) Camión |
| E | Trabajos Civiles Torre 3 | 13 | Cuadrilla trabajos civiles (Especialista y Ayudante) Excavadora Camión |
| F | Trabajos Mecánicos Torre 3 | 13 | Cuadrilla montadores mecánicos (Operador y Ayudante) Camión |
| G | Centro de Transformación (llave en mano) | 43 | Empresa Externa |
| H | Tendido de cable aéreo | 6 | Cuadrilla montadores eléctricos (Operador, Ayudante y Especialista en Tendido de Cable) Camión Unidad Cargadora de Cable |
| I | Tendido de cable superficial | 5 | Cuadrilla montadores eléctricos (Operador, Ayudante y Especialista en Tendido de Cable) Máquina para abrir zanjas |
| J | Conexión, Commissioning y Pruebas | 10 | Grupo eléctrico especializado (2 Operadores, 2 Ayudantes, 1 Especialista y 1 Jefe de Equipo) |

Tabla 6. Duración de Tareas y Recursos del Proyecto. Ejecución Real

| EJECUCIÓN REAL | | | |
|-----------------------|---------------------|------------------|---------------------------------|
| Fecha | Mano de Obra | Máquinas | Centro de Transformación |
| ENERO | 5,600 € | | |
| FEBRERO | 16,240 € | 3,240 € | 116,279 € |
| MARZO | 17,920 € | 7,200 € | 267,442 € |
| ABRIL | 9,520 € | 9,640 € | 116,279 € |
| MAYO | 19,360 € | 640 € | |
| TOTAL | 68,640 € | 20,720 € | 500,000 € |
| TOTAL PROYECTO | | 589,360 € | |

Tabla 7. Calendario de Costes según Ejecución Real

| EJECUCIÓN REAL | | | |
|-----------------------|---------------------|------------------|---------------------------------|
| Fecha | Mano de Obra | Máquinas | Centro de Transformación |
| ENERO | 5,936 € | | |
| FEBRERO | 17,214 € | 3,434 € | 123,256 € |
| MARZO | 18,995 € | 7,632 € | 283,489 € |
| ABRIL | 10,091 € | 10,218 € | 123,256 € |
| MAYO | 20,522 € | 678 € | |
| TOTAL | 72,758 € | 21,963 € | 530,000 € |
| TOTAL PROYECTO | | 624,722 € | |

Tabla 8. Calendario de Facturación según Ejecución Real

5.3.2 CONTROL DEL PROYECTO

La metodología del **Valor Ganado** presenta una ventaja importante y es que se trabaja con una sola variable: las unidades monetarias (€). Se basa en el análisis de tres curvas de costes acumulados: **BCWS** (Budget Cost for Work Scheduled³³) o Línea Base, **ACWP**³⁴ (Actual Cost for Work Performed) y **BCWP**³⁵ (Budget Cost for Work Performed) o Curva del Valor Ganado.

Para conseguir un buen control del proyecto, es importante construir las tres curvas para cada tarea o, al menos, para cada partida presupuestaria. De otro modo, sería imposible saber dónde hay que actuar para corregir las eventuales desviaciones, ya que una tarea puede apantallar a otra.

A partir de dichas gráficas resulta inmediato calcular, en cada momento, las desviaciones en coste **CV** (Cost Variance) y en plazo **SV** (Schedule Variance).

Sin embargo, para poder hacer una estimación de los costes del proyecto³⁶ (o de una tarea, si se trata de un análisis desglosado) a su finalización: **EAC** (Estimate at Completion), es necesario disponer de datos de algún **Pf**³⁷ (Performance Factor), amén del **BAC**³⁸ (Budget at Completion).

³³ Coste Presupuestado para el Trabajo Planificado.

³⁴ Coste Real para el Trabajo Realizado.

³⁵ Coste Presupuestado para el Trabajo Realizado.

³⁶ O de una tarea, si se trata de un análisis desglosado

³⁷ Índice de Ejecución

³⁸ Presupuesto Total Planificado.

En el caso que nos ocupa, la estrategia es la siguiente:

1. No se divide el proyecto en tareas sino en los tres *Centros de Coste* ya descritos: Mano de Obra, Maquinaria y Centro de Transformación.
2. Se hacen todos los cálculos para cada uno de los *Centros de Coste*.
3. Los datos necesarios para trazar la curva **BCWS** provienen de la **Tabla 5**.
4. Los datos necesarios para trazar la curva **ACWP** provienen de la **Tabla 8**.
5. Con todo lo anterior, se obtienen las gráficas y, a partir de ellas, las desviaciones en coste (**CV**=BCWP-BCWS) y plazo (**SV**= BCWP-ACWP). Y también el **BAC**.
6. Se definen cuatro **Pf**:

a. **CPI**= $\left(\frac{BCWP}{ACWP}\right)$ (Cost Performance Index). Mide el rendimiento en términos de coste.

b. **SPI**= $\left(\frac{BCWP}{BCWS}\right)$ (Schedule Performance Index). Mide el rendimiento en términos de ejecución.

c. **SCI**= $(CPI \times SPI)$ (Schedule Cost Index)

d. **Índice Compuesto (20/80)**= $0.8 \times CPI + 0.2 \times SPI$ ³⁹

7. A partir de ellos y mediante la fórmula

$$EAC = ACWP_{cum} + \left(\frac{BAC - BCWP_{cum}}{Pf}\right)$$

se estima el coste final del proyecto (**EAC**) y se compara con el coste final presupuestado (**BAC**). La diferencia entre ambos es el **VAC** (Variance at Completion).

³⁹ Se valora más el coste que la planificación. La proporción asignada es 80/20.

A continuación, se presentan los resultados del proceso descrito, tanto para cada uno de los tres *Centros de Coste* como para el proyecto en su totalidad.

MANO DE OBRA

Los valores absolutos y acumulados de BCWS, ACWP y BCWP están recogidos en la **Tabla 9**. Las curvas de valores acumulados se representan en la gráfica de la **Figura 16**.

La **Tabla 10** registra la evolución temporal de las variaciones en coste (**CV**) y en plazo (**SV**), aunque también se puede acceder a dicha información gráficamente⁴⁰.

| VALORES ABSOLUTOS | | | | | |
|--------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 9,498 € | 18,995 € | 17,214 € | 18,147 € | 551 € |
| BCWP | 5,936 € | 17,214 € | 17,214 € | 10,091 € | 551 € |
| ACWP | 5,936 € | 17,214 € | 18,995 € | 10,091 € | 22,552 € |
| VALORES ACUMULADOS | | | | | |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 9,498 € | 28,493 € | 45,707 € | 63,854 € | 64,405 € |
| BCWP | 5,936 € | 23,150 € | 40,364 € | 50,455 € | 51,006 € |
| ACWP | 5,936 € | 23,150 € | 42,145 € | 52,236 € | 74,788 € |

Tabla 9. BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Mano de Obra”. Valores Absolutos y Acumulados

⁴⁰ Ver **Figura 16**.

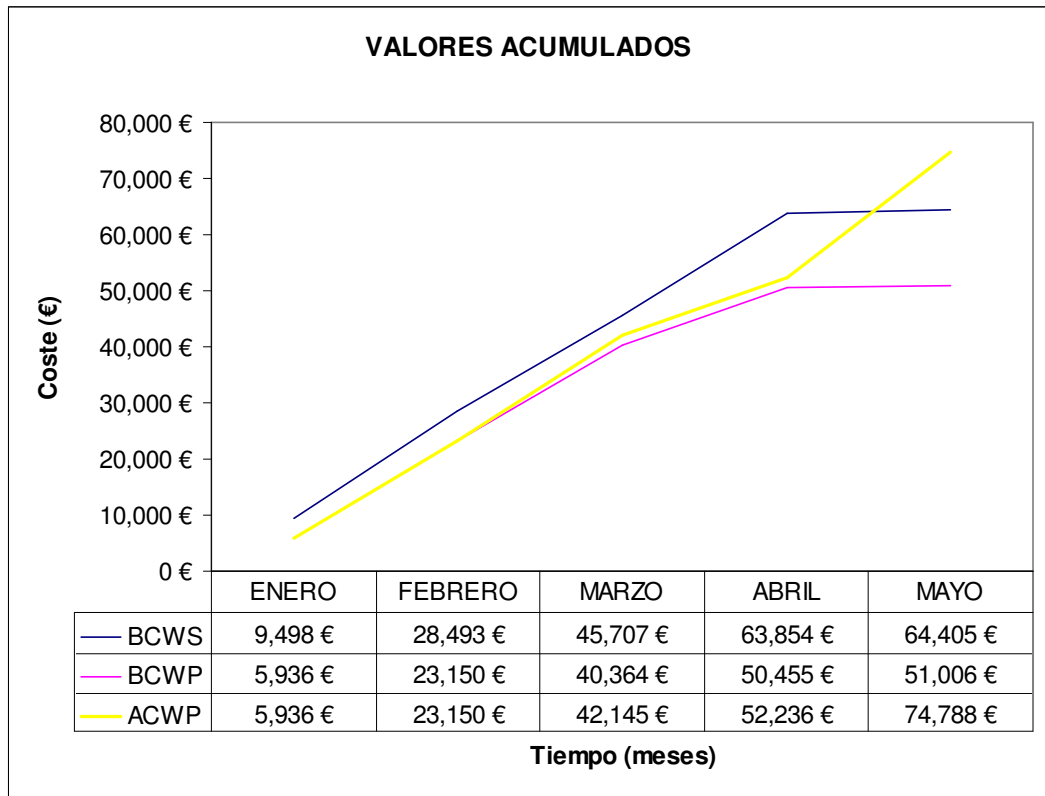


Figura 16. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Mano de Obra”

| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
|------------------|----------------|----------|----------|-----------|----------------|
| SV cum | -3,562 € | -5,343 € | -5,343 € | -13,399 € | -13,399 € |
| SV (%)cum | -37.50% | -18.75% | -11.69% | -20.98% | -20.80% |
| CV cum | 0 € | 0 € | -1,781 € | -1,781 € | -23,782 € |
| CV (%)cum | 0.00% | 0.00% | -4.41% | -3.53% | -46.63% |
| BAC | 51,006 € | | | | |

Tabla 10. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el C.C. “Mano de Obra”

La asignación real de los costes de "*Mano de Obra*" está muy desajustada en plazos respecto a la planificación inicial: En Enero, **SV (%)** alcanza un retraso del **37,50%**. A lo largo de Febrero y Marzo, disminuye hasta llegar al 11.69%, estabilizándose en Abril y Mayo en torno al 20%.

En cuanto a los costes, no hay sobrecostes en Enero ni en Febrero. En Marzo-Abril, éstos crecen ligeramente y alcanzan el entorno del 4%. Es en Mayo cuando **CV (%)** se dispara (hasta alcanzar el **46,63%**), debido a que se intentó corregir el retraso del proyecto incrementando el personal asignado a la última tarea (**J: Conexión, Commissioning y Pruebas**).

La **Tabla 11** recoge la evolución temporal de EAC_{cum} y VAC, para cada uno de los cuatro Pf definidos. Su representación gráfica está en la **Figura 17**.

| ENERO | | | | |
|---------------------------------|-----------|---------------|------------|---------------|
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 51,006 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.62 | 78,051 € | -27,045 € | -53.02% |
| SCI | 0.62 | 78,051 € | -27,045 € | -53.02% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.92 | 54,661 € | -3,655 € | -7.17% |
| FEBRERO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 51,006 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.81 | 57,435 € | -6,429 € | -12.60% |
| SCI | 0.81 | 57,435 € | -6,429 € | -12.60% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.96 | 52,091 € | -1,085 € | -2.13% |
| MARZO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 0.96 | 52,235 € | -1,229 € | -2.41% |
| SPI | 0.88 | 54,693 € | -3,687 € | -7.23% |
| SCI | 0.85 | 56,085 € | -5,079 € | -9.96% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.94 | 52,696 € | -1,690 € | -3.31% |
| ABRIL | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 0.97 | 51,989 € | -983 € | -1.93% |
| SPI | 0.79 | 58,404 € | -7,398 € | -14.50% |
| SCI | 0.76 | 59,648 € | -8,642 € | -16.94% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.93 | 53,078 € | -2,072 € | -4.06% |
| MAYO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 0.96 | 52,235 € | -1,229 € | -2.41% |
| SPI | 0.88 | 54,693 € | -3,687 € | -7.23% |
| SCI | 0.85 | 56,085 € | -5,079 € | -9.96% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.94 | 52,696 € | -1,690 € | -3.31% |

Tabla 11. Evolución temporal de EAC y VAC para el C.C. “Mano de Obra”, según los distintos Pf

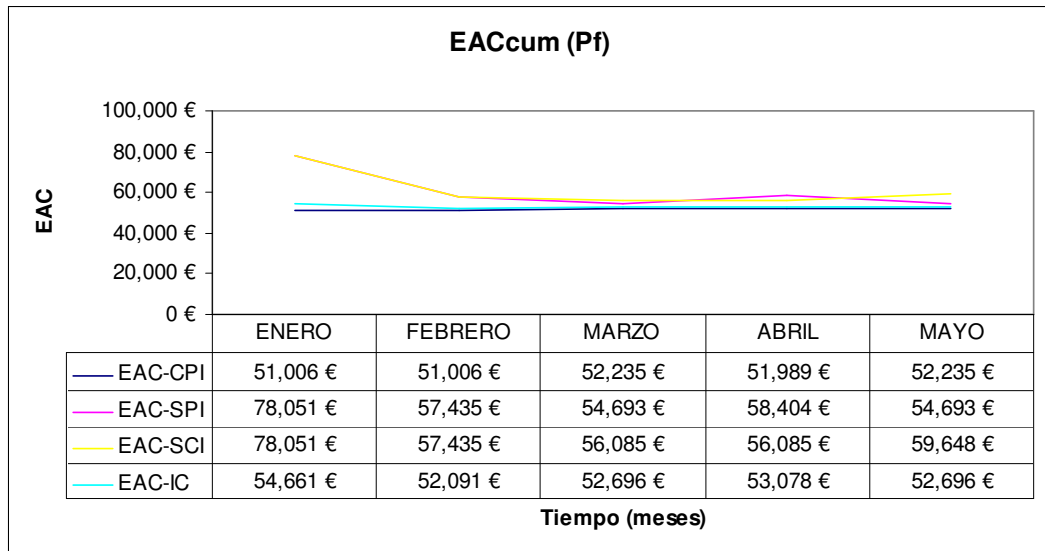


Figura 17. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el C.C. “Mano de Obra”

EAC-CPI es la mejor estimación, especialmente en las fases iniciales del proyecto⁴¹. Además, es muy estable (al igual que **EAC-IC**, que es también una buena estimación).

EAC-SCI y **EAC-SPI** son coincidentes durante los dos primeros meses y muy semejantes los tres meses siguientes. Son también más inestables y decididamente peores al inicio del proyecto (aunque después mejoran).

⁴¹ Llega a proporcionar un VAC=0 durante los dos primeros meses.

MÁQUINAS

Los valores absolutos y acumulados de BCWS, ACWP y BCWP están recogidos en la **Tabla 12**. Las curvas de valores acumulados se representan en la gráfica de la **Figura 18**.

La **Tabla 13** registra la evolución temporal de las variaciones en coste (**CV**) y en plazo (**SV**), aunque también se puede acceder a dicha información gráficamente⁴².

| VALORES ABSOLUTOS | | | | | |
|--------------------|-------|---------|----------|----------|----------|
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 0 € | 4,579 € | 8,777 € | 8,607 € | 0 € |
| BCWP | 0 € | 3,434 € | 7,632 € | 8,607 € | 0 € |
| ACWP | 0 € | 3,434 € | 7,632 € | 10,218 € | 678 € |
| VALORES ACUMULADOS | | | | | |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 0 € | 4,579 € | 13,356 € | 21,963 € | 21,963 € |
| BCWP | 0 € | 3,434 € | 11,066 € | 19,673 € | 19,673 € |
| ACWP | 0 € | 3,434 € | 11,066 € | 21,284 € | 21,962 € |

Tabla 12. BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. "Máquinas". Valores Absolutos y Acumulados

⁴² Ver **Figura 18**.

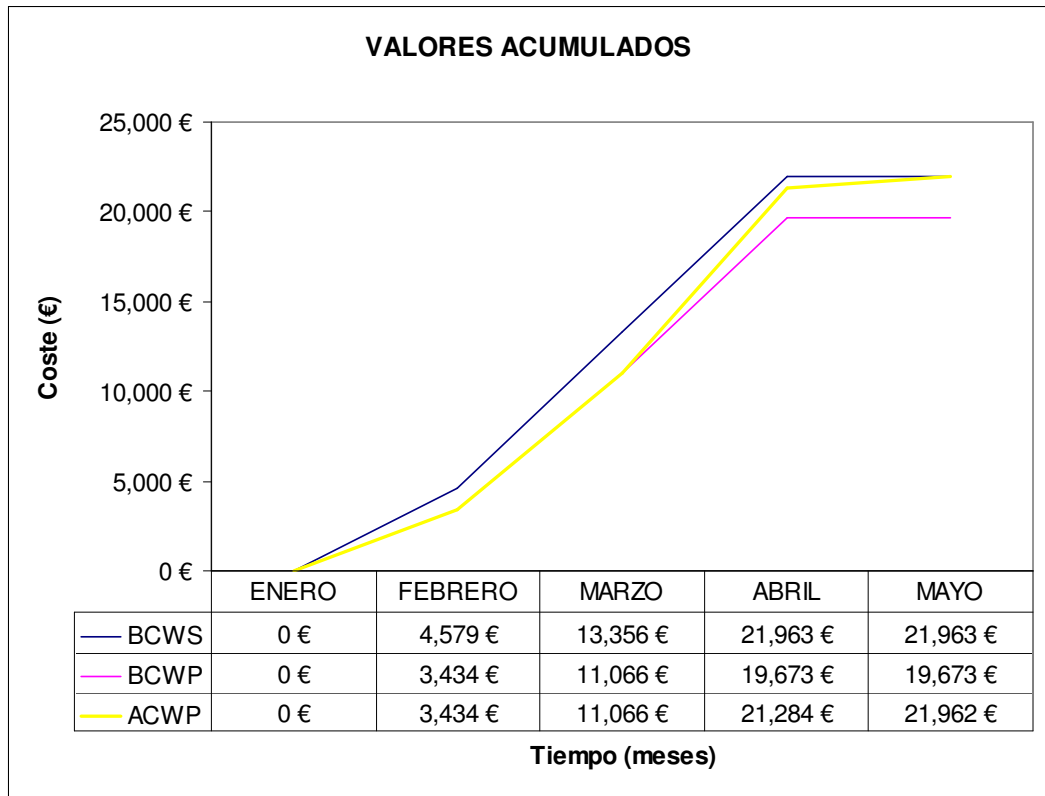


Figura 18. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. "Máquinas"

| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| SV cum | 0 € | -1,145 € | -2,290 € | -2,290 € | -2,290 € |
| SV (%)cum | 0.00% | -25.01% | -17.15% | -10.43% | -10.43% |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| CV cum | 0 € | 0 € | 0 € | -1,611 € | -2,289 € |
| CV (%)cum | | 0.00% | 0.00% | -8.19% | -11.64% |
| BAC | 19,673 € | | | | |

Tabla 13. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el C.C. "Máquinas"

El *Centro de Coste "Máquinas"* está bastante desajustado en plazos respecto a la planificación inicial.

A los trabajos que se llevan a cabo en Enero no se les han asignado recursos de maquinaria, así que $SV=0$. Pero en Febrero, **SV (%)** alcanza un máximo del **25,10%**. Dicho índice comienza a disminuir en Marzo, estabilizándose en un 10.43% en Abril y Mayo.

En cuanto a los sobrecostes, no aparecen hasta el mes de Abril, con un **CV(%)** del 8.19%, creciendo durante al mes de Mayo hasta el **11.64%**.

La **Tabla 14** recoge la evolución temporal de EAC_{cum} y VAC, para cada uno de los cuatro Pf definidos. Su representación gráfica está en la **Figura 19**.

| ENERO | | | | |
|---------------------------------|-----------|---------------|------------|---------------|
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | | | | |
| SPI | | | | |
| SCI | | | | |
| Índice Compuesto (20/80) | | | | |
| FEBRERO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 19,673 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.75 | 25,088 € | -5,415 € | -27.52% |
| SCI | 0.75 | 25,088 € | -5,415 € | -27.52% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.95 | 20,528 € | -855 € | -4.35% |
| MARZO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 19,673 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.83 | 23,034 € | -3,361 € | -17.08% |
| SCI | 0.83 | 23,034 € | -3,361 € | -17.08% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.97 | 20,250 € | -577 € | -2.93% |
| ABRIL | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 0.92 | 21,003 € | -1,330 € | -6.76% |
| SPI | 0.90 | 21,563 € | -1,890 € | -9.61% |
| SCI | 0.83 | 23,048 € | -3,375 € | -17.15% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.92 | 21,112 € | -1,439 € | -7.32% |
| MAYO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 19,673 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.83 | 23,034 € | -3,361 € | -17.08% |
| SCI | 0.83 | 23,034 € | -3,361 € | -17.08% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.97 | 20,250 € | -577 € | -2.93% |

Tabla 14. Evolución temporal de EAC y VAC para el C.C. “Máquinas”, según los distintos Pf

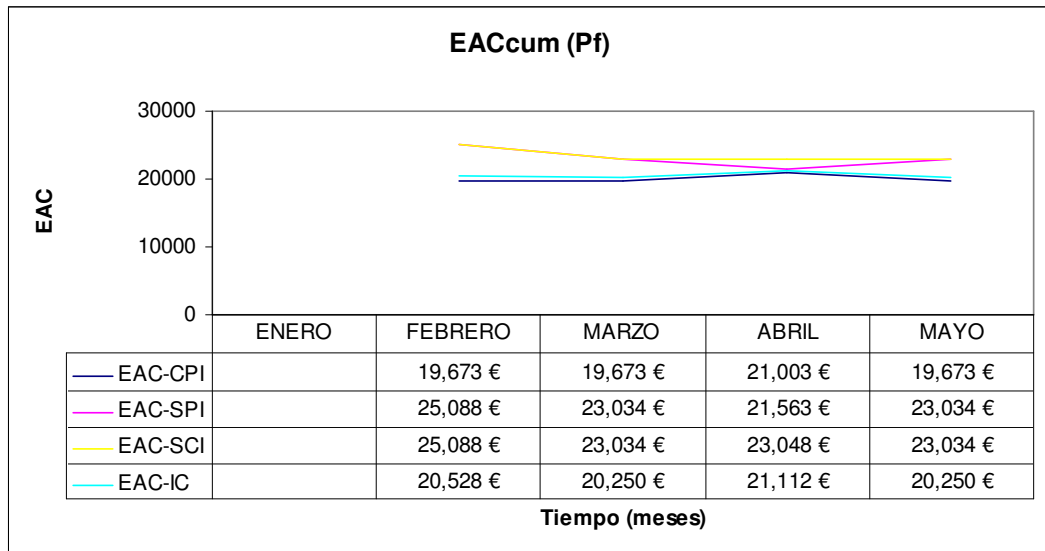


Figura 19. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el C.C. “Máquinas”

No se empieza a usar maquinaria hasta el segundo mes, de manera que las curvas de evolución de EAC comienzan en Febrero.

EAC-CPI es la mejor estimación, proporcionando un $VAC=0$, con la única excepción del mes de Abril. **EAC-IC** sería la segunda mejor opción (es fácil ver en la Figura 19 que la línea cian coincide prácticamente con la azul).

EAC-SCI y **EAC-SPI** sólo se diferencian en la previsión para el mes de Abril (a favor de SPI). Los datos de los demás meses son coincidentes y definitivamente peores que los de **EAC-CPI** y **EAC-IC**.

CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Los valores absolutos y acumulados de BCWS, ACWP y BCWP están recogidos en la **Tabla 15**. Las curvas de valores acumulados se representan en la gráfica de la **Figura 20**.

La **Tabla 16** registra la evolución temporal de las variaciones en coste (**CV**) y en plazo (**SV**), aunque también se puede acceder a dicha información gráficamente⁴³.

| VALORES ABSOLUTOS | | | | | |
|--------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 0 € | 246,511 € | 283,489 € | 0 € | 0 € |
| BCWP | 0 € | 123,256 € | 283,489 € | 0 € | 0 € |
| ACWP | 0 € | 123,256 € | 283,489 € | 123,256 € | 0 € |
| VALORES ACUMULADOS | | | | | |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 0 € | 246,511 € | 530,000 € | 530,000 € | 530,000 € |
| BCWP | 0 € | 123,256 € | 406,745 € | 406,745 € | 406,745 € |
| ACWP | 0 € | 123,256 € | 406,745 € | 530,001 € | 530,001 € |

Tabla 15. BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Centro de Transformación”. Valores Absolutos y Acumulados

⁴³ Ver **Figura 20**.

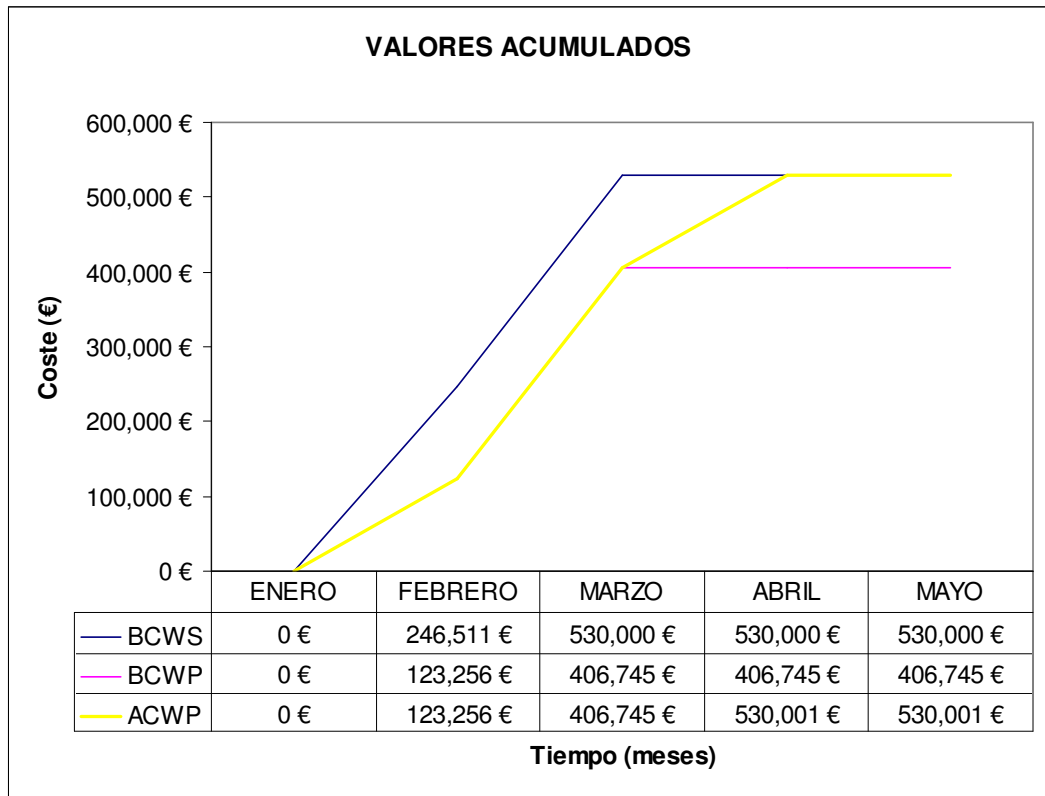


Figura 20. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el C.C. “Centro de Transformación”

| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
|------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| SV cum | 0 € | -123,255 € | -123,255 € | -123,255 € | -123,255 € |
| SV (%)cum | 0.00% | -50.00% | -23.26% | -23.26% | -23.26% |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| CV cum | 0 € | 0 € | 0 € | -123,256 € | -123,256 € |
| CV (%)cum | | 0.00% | 0.00% | -30.30% | -30.30% |
| BAC | 406,745 € | | | | |

Tabla 16. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el C.C. “Centro de Transformación”

La construcción del Centro de Transformación es un “*llave en mano*”, de manera que la asignación de recursos es una partida alzada. De manera que su desajuste en plazos **SV (%)** y en coste **CV (%)** se debe exclusivamente al retraso con el que se acometió. Y es que tanto su duración como los recursos asignados (500.000 €) son los que se planificaron inicialmente.

La **Tabla 17** recoge la evolución temporal de EAC_{cum} y VAC , para cada uno de los cuatro Pf definidos. Su representación gráfica está en la **Figura 21**.

| ENERO | | | | |
|---------------------------------|-----------|---------------|------------|---------------|
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | | | | |
| SPI | | | | |
| SCI | | | | |
| Índice Compuesto (20/80) | | | | |
| FEBRERO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 406,745 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.50 | 690,232 € | -283,487 € | -69.70% |
| SCI | 0.50 | 690,232 € | -283,487 € | -69.70% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.90 | 438,244 € | -31,499 € | -7.74% |
| MARZO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 406,745 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.77 | 492,650 € | -85,905 € | -21.12% |
| SCI | 0.77 | 492,650 € | -85,905 € | -21.12% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.95 | 420,574 € | -13,829 € | -3.40% |
| ABRIL | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 0.77 | 492,651 € | -85,906 € | -21.12% |
| SPI | 0.77 | 492,650 € | -85,905 € | -21.12% |
| SCI | 0.59 | 604,588 € | -197,843 € | -48.64% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.77 | 492,651 € | -85,906 € | -21.12% |
| MAYO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 406,745 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.77 | 492,650 € | -85,905 € | -21.12% |
| SCI | 0.77 | 492,650 € | -85,905 € | -21.12% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.95 | 420,574 € | -13,829 € | -3.40% |

Tabla 17. Evolución temporal de EAC y VAC para el C.C. “Centro de Transformación”, según los distintos Pf

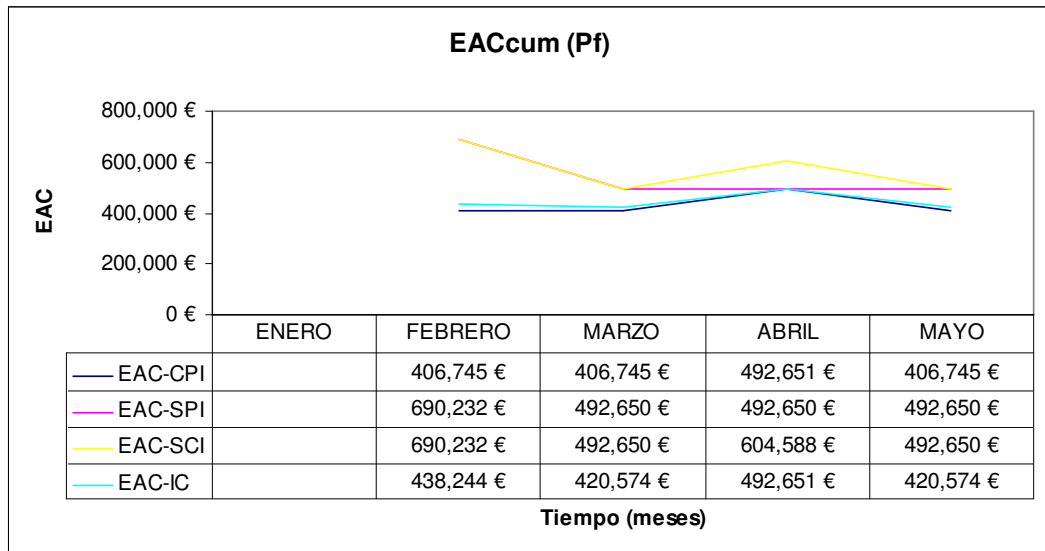


Figura 21. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el C.C. “Centro de Transformación”

Al igual que en el caso del *Centro de Coste “Máquinas”*, no se cuenta con datos del mes de Enero.

EAC-CPI es la mejor estimación, proporcionando un $VAC=0$, con la única excepción del mes de Abril, en el que existe una desviación importante (-21.12%) respecto al BAC. **EAC-IC** sufre la misma desviación en Abril y los demás meses sus previsiones son también muy buenas, aunque no tanto como las **EAC-CPI**.

EAC-SCI y **EAC-SPI** sólo se diferencian en la previsión para el mes de Abril (a favor de SPI). Ambos resultan muy inestables y necesitan llegar al final del proyecto para dar una previsión aceptable.

PROYECTO COMPLETO

Los valores absolutos y acumulados de BCWS, ACWP y BCWP están recogidos en la **Tabla 18**. Las curvas de valores acumulados se representan en la gráfica de la **Figura 22**.

La **Tabla 19** registra la evolución temporal de las variaciones en coste (**CV**) y en plazo (**SV**), aunque también se puede acceder a dicha información gráficamente⁴⁴.

| VALORES ABSOLUTOS | | | | | |
|--------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 9,498 € | 270,085 € | 309,480 € | 26,754 € | 551 € |
| BCWP | 5,936 € | 143,904 € | 308,335 € | 18,698 € | 551 € |
| ACWP | 5,936 € | 143,904 € | 310,116 € | 143,565 € | 23,230 € |
| VALORES ACUMULADOS | | | | | |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| BCWS | 9,498 € | 279,583 € | 589,063 € | 615,817 € | 616,368 € |
| BCWP | 5,936 € | 149,840 € | 458,175 € | 476,873 € | 477,424 € |
| ACWP | 5,936 € | 149,840 € | 459,956 € | 603,521 € | 626,751 € |

Tabla 18. BCWS, BCWP y ACWP para el Proyecto Completo. Valores Absolutos y Acumulados

⁴⁴ Ver **Figura 22**.

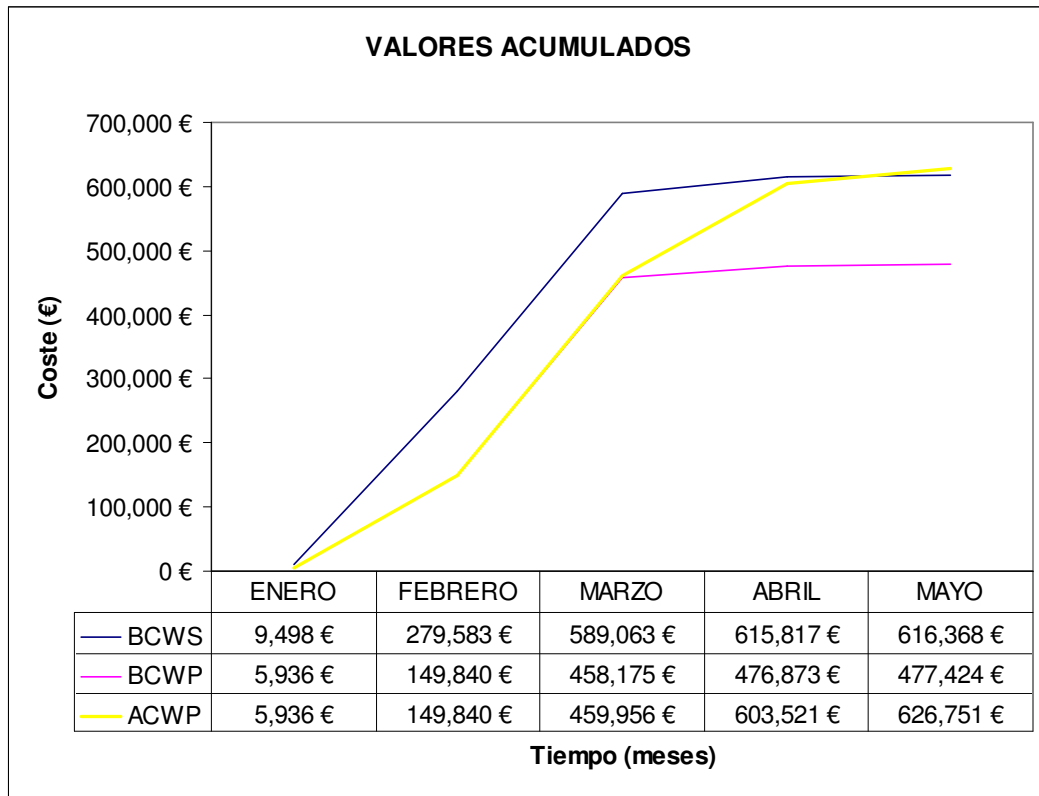


Figura 22. Curvas de Valores Acumulados de BCWS, BCWP y ACWP para el Proyecto Completo

| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
|------------------|-----------|----------------|------------|------------|----------------|
| SV cum | -3,562 € | -129,743 € | -130,888 € | -138,944 € | -138,944 € |
| SV (%)cum | -37.50% | -46.41% | -22.22% | -22.56% | -22.54% |
| | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO |
| CV cum | 0 € | 0 € | -1,781 € | -126,648 € | -149,327 € |
| CV (%)cum | 0.00% | 0.00% | -0.39% | -26.56% | -31.28% |
| BAC | 477,424 € | | | | |

Tabla 19. Evolución temporal de SV, CV y BAC, para el Proyecto Completo

El proyecto está muy desajustado en plazos: En Enero, **SV (%)** es del 37.50%, creciendo hasta el **46.41%** en Febrero y estabilizándose en torno al 22 % durante los meses siguientes.

En cuanto a los costes, sólo existe un sobrecoste significativo durante los meses de Abril y Mayo (alrededor del 30%). El máximo se alcanza durante el mes de Mayo, con **CV (%)=31.28%**.

La **Tabla 20** recoge la evolución temporal de EAC_{cum} y VAC, para cada uno de los cuatro Pf definidos. Su representación gráfica está en la **Figura 23**.

| ENERO | | | | |
|---------------------------------|-----------|---------------|------------|---------------|
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 477,424 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.62 | 760,349 € | -282,925 € | -59.26% |
| SCI | 0.62 | 760,349 € | -282,925 € | -59.26% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.92 | 515,656 € | -38,232 € | -8.01% |
| FEBRERO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 477,424 € | 0 € | 0.00% |
| SPI | 0.54 | 761,071 € | -283,647 € | -59.41% |
| SCI | 0.54 | 761,071 € | -283,647 € | -59.41% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.91 | 510,938 € | -33,514 € | -7.02% |
| MARZO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 478,697 € | -1,273 € | -0.27% |
| SPI | 0.78 | 571,006 € | -93,582 € | -19.60% |
| SCI | 0.77 | 572,643 € | -95,219 € | -19.94% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.95 | 493,774 € | -16,350 € | -3.42% |
| ABRIL | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 0.79 | 564,424 € | -87,000 € | -18.22% |
| SPI | 0.77 | 572,870 € | -95,446 € | -19.99% |
| SCI | 0.61 | 685,219 € | -207,795 € | -43.52% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.79 | 566,086 € | -88,662 € | -18.57% |
| MAYO | | | | |
| | Pf | EACcum | VAC | VAC(%) |
| CPI | 1.00 | 478,697 € | -1,273 € | -0.27% |
| SPI | 0.78 | 571,006 € | -93,582 € | -19.60% |
| SCI | 0.77 | 572,643 € | -95,219 € | -19.94% |
| Índice Compuesto (20/80) | 0.95 | 493,774 € | -16,350 € | -3.42% |

Tabla 20. Evolución temporal de EAC y VAC para el Proyecto Completo, según los distintos Pf

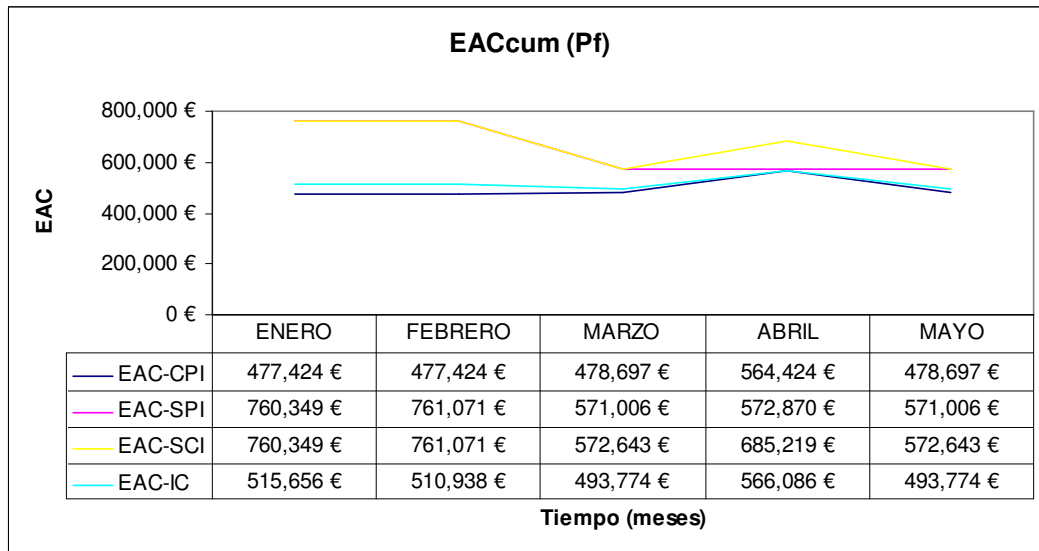


Figura 23. Representación Gráfica de la Evolución Temporal de los distintos EAC para el Proyecto Completo

EAC-CPI es la mejor estimación, proporcionando un VAC=0 los dos primeros meses y prácticamente nulos los dos últimos. Durante el mes de Abril la desviación respecto al VAC alcanza el 18.22% (lo que se debe, fundamentalmente a la partida “**Centro de Transformación**”, aunque también en menor medida a “**Máquinas**”).

EAC-IC es la segunda mejor opción, siendo su representación gráfica prácticamente coincidente con la de **EAC-CPI**.

EAC-SCI y **EAC-SPI** sólo se diferencian en la previsión para el mes de Abril (a favor de SPI)⁴⁵. Ambos resultan muy inestables y necesitan llegar al final del proyecto para dar una previsión aceptable.

⁴⁵ Lo que podía esperarse, ya que es una pauta que siguen los tres *Centros de Coste* que forman el Proyecto Completo.

6. CONCLUSIONES

Después del análisis de diferentes metodologías de planificación, se propone el método **LSM** (*Linear Schedule Method*) como la mejor de las opciones disponibles para planificar **Proyectos Lineales y Repetitivos**.

Se trata de un método con una componente gráfica muy importante, ya que se basa en un diagrama espacio-temporal. Es por ello que, pese a haberse hecho avances a lo largo de los últimos cincuenta años⁴⁶, sólo ha tomado auténtica entidad como método de planificación cuando se ha podido contar con el software adecuado que facilite las actualizaciones (**TILOS**).

El presente trabajo presenta un **análisis comparativo de los Caminos Críticos que presenta un proyecto lineal repetitivo, según cual sea la metodología de planificación empleada**.

Para poder hacer dicho análisis se ha optado por trabajar con un proyecto lineal sencillo tipo “línea eléctrica” cuya doble naturaleza⁴⁷ permite:

1. Planificar con **LSM** y calcular el *Camino Crítico* con el algoritmo **KRLPM**.
2. Planificar con **GANTT** y calcular el *Camino Crítico* con el algoritmo **PERT**.

Los resultados así obtenidos son **dos Caminos Críticos distintos**, aunque con la misma duración. Lo que no es raro en modo alguno, ya que no sólo se trata de dos metodologías muy diferentes (un algoritmo gráfico frente a un diagrama de red) si no que hasta el concepto mismo de *Actividad Crítica* se define de manera distinta.

⁴⁶ Se comenzó a trabajar en esta dirección los años 60 del siglo XX.

⁴⁷ Lineal y sencillo.

Además, dentro de un proyecto lineal puede haber actividades que no lo sean⁴⁸ y:

1. **PERT** no considera la naturaleza lineal de las actividades.
2. **KRLPM** trata todas las actividades como si fueran lineales.

Por todo lo expuesto, se propone como **TRABAJO FUTURO** el *desarrollo de un algoritmo matemático⁴⁹ que facilite el cálculo del Camino Crítico en proyectos lineales de naturaleza continua y que proporcione un tratamiento adecuado a las eventuales tareas no lineales.*

En otro orden de las cosas, el presente trabajo propone **una metodología de control para proyectos lineales planificados con LSM, basada en el Método del Valor Ganado**. Para ejemplificar dicha propuesta:

1. Se emplea el mismo proyecto lineal tipo “línea eléctrica” sobre el que se hizo el cálculo comparativo de los *Caminos Críticos*.

Al igual que en el caso anterior, para la planificación con **LSM** se hace uso del programa **TILOS**.

2. Se asignan recursos a las actividades y se diseñan modificaciones sobre la planificación inicial que ejemplifiquen el avance.

TILOS facilita la asignación de recursos y las actualizaciones. Toda la información se incluye en un único archivo.

3. El análisis no se hace a partir de las actividades si no de los **Centros de Coste**.

⁴⁸ En nuestro proyecto ejemplo hay actividades lineales, repetitivas e incluso una actividad singular.

⁴⁹ Se busca minimizar la imprecisión de algoritmos gráficos, como es el **KRLPM**.

Al introducir información sobre recursos en **TILOS** debe asignarse a un *Centro de Coste*. De manera que las relaciones: Recurso-Actividad y Recurso-*Centro de Coste* son igualmente unívocas.

4. Toda la información proviene de dos hitos temporales: **la primera piedra y el hito de cierre**.

De este modo se obtienen **resultados “post-mortem” del proyecto** o, lo que es lo mismo, se analiza dónde se produjeron las desviaciones y a qué se debieron.

Como **TRABAJO FUTURO** se propone desarrollar un procedimiento automatizado para trasladar de una manera más eficiente los resultados obtenidos desde la planificación **LSM** al **control periódico del proyecto, con propuestas para corregir las desviaciones y análisis de los resultados**.

En cada medida que se tome deberán tenerse en cuenta los posibles escenarios, en función de la continuidad en el uso de los recursos y la corrección de los costes.

7. REFERENCIAS

- [1] AIYING JIANG, BING CHENG, 2006. *Comparison of Gantt Chart Scheduling Method and Linear Scheduling Method in Scheduling Multiple Utility Line Construction Project*. 2006
- [2] ALEXANDROS KALLANTZIS, JOHN SOLDATOS y SERGIOS LAMBROPOULOS, 2007. *Linear versus Network Scheduling. A Critical Path Comparison*. Journal of Construction Engineering and Management, 2007
- [3] CARLA LÓPEZ DEL PUERTO, DOUGLAS D. GRANSBERG, 2008. *Linear Schedule Fundamentals for Cost Engineers*. AACC International Transactions. 2008
- [4] GUNNAR LUCKO, 2008. *Productivity Scheduling Method Compared to Linear and Repetitive Project Scheduling Method*. Journal of Construction Engineering and Management. 2008
- [5] GUNNAR LUCKO, 2008. *Productivity Scheduling Method: Linear Schedule Analysis with Singularity Functions*. 2008
- [6] IBRAHIM M. MAHDI, 2003. *A new LSM approach for planning repetitive housing projects*. International Journal of Project Management, 2003
- [7] IULIAN TROFIN, 2004. *Impact of Uncertainty on Construction Project Performance using Linear Scheduling*. University of Florida. 2004
- [8] JAE-SEOB LEE, 2007. *Delay Analysis Using Linear Schedule in Construction*. AACC International Transactions. 2007
- [9] KENN STEGER-JENSEN, HANS-HENRIK HVOLBY, PETER NIELSEN, IZABELA NIELSEN, 2011. *Advanced Planning and Scheduling Technology*. Production Planning and Control. 2011.

- [10] KRIS G. MATTILA, AMY PARK, 2003. *Comparison of Linear Scheduling Model and repetitive Scheduling Method*. 2003
- [11] RENÉ A. YAMÍN, DAVID J. HARMELINK, 2001. *Comparison of Linear Scheduling Model (LSM) and Critical Path Method (CPM)*. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2001
- [12] DOUGLAS D. GRANSBERG, 2007. *Converting Linear Schedules to Critical Path Method Precedence*. *AACC International Transactions*. 2007
- [13] WEIHONG GU, RAN ZHAO, 2010. *Application of the Critical Chain Technique to the Railway Tunnel Project Scheduling Risk Controlling*. *Proceedings Paper from the 1st International Conference on Railway Engineering: High-speed Railway*. 2011