

2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

2.1. Introducción.

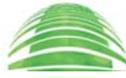
La gestión de proyectos se encarga de dar respuesta a preguntas como estas ¿Cómo lo vamos a poder hacer? ¿Por donde comenzamos? Sin embargo, la gestión de proyectos significa y es mucho más que todo esto. Pero antes de discutir acerca de la gestión de proyectos habrá que tratar de definir lo que entendemos por proyecto.

Un *proyecto* es una empresa planificada que consiste en un conjunto de actividades que se encuentran interrelacionadas y coordinadas; la razón de un proyecto es alcanzar objetivos específicos dentro de los límites que imponen un presupuesto y un lapso de tiempo previamente definidos.

La gestión de proyectos se define como planificar, secuenciar y controlar las actividades que conforman el proyecto con el fin de conseguir objetivos de resultados (rendimiento del proyecto) en coste y tiempo. Para conseguir estos objetivos habrá de tenerse en cuenta que los recursos y factores se utilicen de forma eficiente y efectiva.

Estas cuatro variables aparecen profundamente relacionadas entre sí: *coste*, *tiempo*, *recursos* y *resultados*. Los *resultados* obtenidos dependerán de los *recursos* que participen en un proyecto planeado para una *duración* determinada y un *presupuesto* asignado. El principal problema es que la relación de dependencia nunca será conocida con precisión.

Es necesario implantar una filosofía de gestión de proyectos mediante una estrategia enfocada al largo plazo en lugar de a corto plazo, es decir una estrategia proactiva en lugar de reactiva.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

La gestión proactiva es planificar antes de actuar, es sopesar todas las opciones antes de tomar decisiones. La gestión proactiva es primero analizar el problema y después buscar la solución, en lugar de querer aplicar una solución preconcebida e imponerla.

La Figura 1 refleja los aspectos a los que debe atender una gestión proactiva.

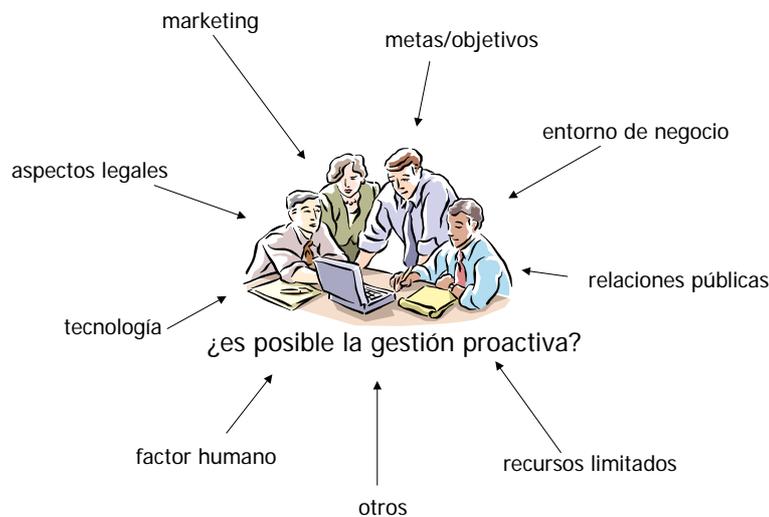
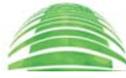


Figura 1. Gestión proactiva de proyectos

En primer lugar una gestión proactiva debería descansar en un equipo más que en un único gestor. El equipo debe diseñar y controlar el plan de actuación del proyecto de acuerdo a las metas y objetivos fijados. El equipo debería estar preparado para saber gestionar las relaciones profesionales y humanas tanto en el equipo de trabajo como con el cliente. Debería saber gestionar los problemas y aspectos legales que pudieran rodear al proyecto. Debería saber dar respuesta rápida a los problemas y dificultades que surgieran entre el grupo humano envuelto en el proyecto. Debería no perder la referencia de lo que el mercado y el cliente espera de nuestro producto. También debería controlar el entorno de negocio, y por supuesto debe conocer la disponibilidad de recursos así como tecnología de la que dispone con el fin de diseñar planes creíbles y realistas.

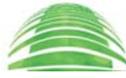


2.2. Características de una gestión de proyectos proactiva.

2.2.1 Áreas de actuación en la gestión de proyectos

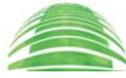
El Project Management Institute (PMI) es una asociación internacional de profesionales que trabajan en el ámbito de la gestión de proyectos. Según la Guía del PMBOK[®] (en su tercera edición), publicado por esta asociación, se identifican nueve áreas de conocimiento en la gestión de proyectos.

- Gestión de la integración del proyecto. Incluye los procesos y actividades necesarios para identificar, definir, combinar, unificar y coordinar los distintos procesos y actividades.
- Gestión del alcance del proyecto. La Gestión del Alcance del Proyecto incluye los procesos necesarios para asegurarse que el proyecto incluya todo el trabajo requerido, y sólo el trabajo requerido, para completar el proyecto satisfactoriamente.
- Gestión de secuenciación/tiempo. La Gestión del Tiempo del Proyecto incluye los procesos necesarios para lograr la conclusión del proyecto a tiempo. Para ello es necesario la aplicación de métodos como el PERT-tiempos, CPM, diagramas de GANTT, etc. En el apartado sexto estudiaremos estas técnicas en mayor grado de detalle.
- Gestión de costes. La Gestión de los Costes del Proyecto incluye los procesos involucrados en la planificación, estimación, preparación del presupuesto y control de costes de forma que el proyecto se pueda completar dentro del presupuesto aprobado, es necesario emplear diversas técnicas como el PERT-costes, etc.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- Gestión de la calidad. Los procesos de Gestión de la Calidad del Proyecto incluyen todas las actividades de la organización ejecutante que determinan las políticas, los objetivos y las responsabilidades relativos a la calidad de modo que el proyecto satisfaga las necesidades por las cuales se emprendió. Es necesario aplicar las herramientas y técnicas de Gestión de Calidad Total.
- Recursos humanos. La Gestión de los Recursos Humanos del Proyecto incluye los procesos que organizan y dirigen el equipo del proyecto. Para ello hay que abrir canales de comunicación entre los grupos humanos implicados y garantizar que permanezcan abiertos durante el ciclo de vida del proyecto. También hay que incluir en este aspecto la relación con la Administración, en lo referente a pago de tasas, permisos, licencias, etc... y por supuesto con los financiadores del proyecto que al final son los clientes que habrán de encontrar un producto satisfactorio.
- Gestión de contratos. La Gestión de las Adquisiciones del Proyecto incluye los procesos para comprar o adquirir los productos, servicios o resultados necesarios fuera del equipo del proyecto para realizar el trabajo.
- Política de comunicación. La Gestión de las Comunicaciones del Proyecto es el área de conocimiento que incluye los procesos necesarios para asegurar la generación, recogida, distribución, almacenamiento, recuperación y destino final de la información del proyecto en tiempo y forma. Para ello es necesario disponer de las herramientas necesarias para comunicar a las personas adecuadas en el momento adecuado, utilizando el procedimiento apropiado. Algunas veces una comunicación escrita será lo conveniente, y en otras será preferible la comunicación directa cara-a-cara.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- Gestión del riesgo. La Gestión de los Riesgos del Proyecto incluye los procesos relacionados con la planificación de la gestión de riesgos, la identificación y el análisis de riesgos, las respuestas a los riesgos, y el seguimiento y control de riesgos de un proyecto; la mayoría de estos procesos se actualizan durante el proyecto. Existen metodologías para la gestión de proyectos que incorporan procedimientos para la gestión del riesgo, ejemplo de ellas son las técnicas GERT o VERT.

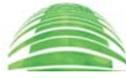
2.2.2 Ciclo de vida de un proyecto

Para facilitar la gestión, la organización pueden dividir los proyectos en fases, con los enlaces correspondientes a las operaciones de la organización ejecutante. El conjunto de estas fases se conoce como ciclo de vida del proyecto.

El ciclo de vida del proyecto define las fases que conectan el inicio de un proyecto con su fin. La transición de una fase a otra dentro del ciclo de vida de un proyecto generalmente implica y, por lo general, está definida por alguna forma de transferencia técnica. Generalmente, los productos entregables de una fase se revisan para verificar si están completos, si son exactos y se aprueban antes de iniciar el trabajo de la siguiente fase. No obstante, no es inusual que una fase comience antes de la aprobación de los productos entregables de la fase previa, cuando los riesgos involucrados se consideran aceptables. Esta práctica de superponer fases, que normalmente se realiza de forma secuencial, es un ejemplo de la aplicación de la técnica de compresión del cronograma denominada ejecución rápida.

La mayoría de los ciclos de vida de proyectos comparten determinadas características comunes:

- En términos generales, las fases son secuenciales y, normalmente, están definidas por alguna forma de transferencia de información técnica o transferencia de componentes técnicos.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- El nivel de coste y de personal es bajo al comienzo, alcanza su nivel máximo en las fases intermedias y cae rápidamente cuando el proyecto se aproxima a su conclusión. La Figura 2 ilustra este patrón.

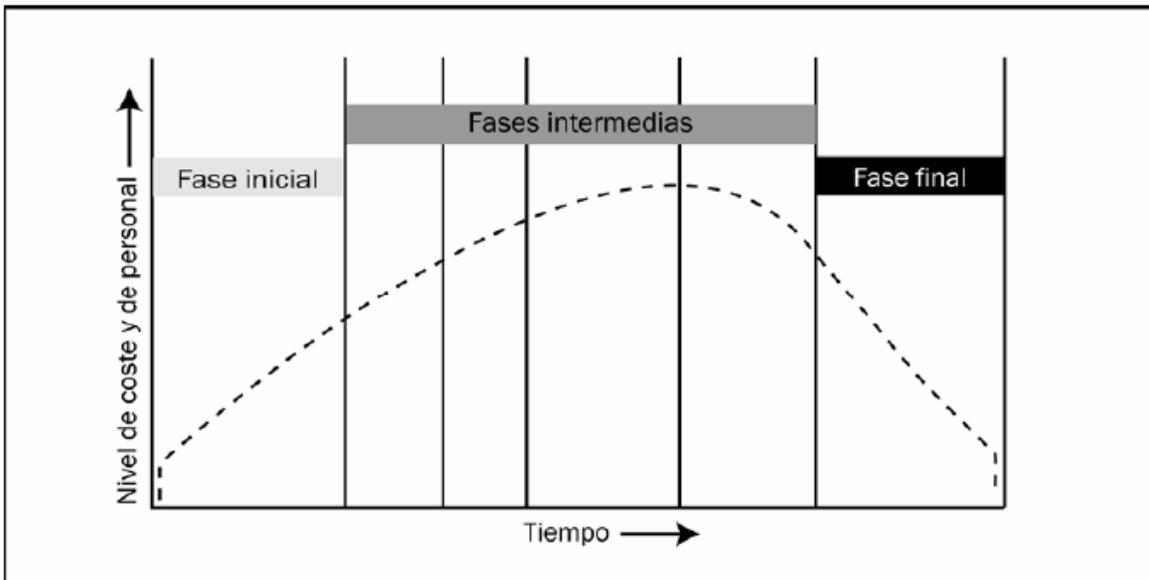
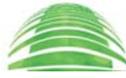


Figura 2. Coste del proyecto y nivel de personal típicos a lo largo del ciclo de vida del proyecto

- El nivel de incertidumbre es el más alto y, por lo tanto, el riesgo de no cumplir con los objetivos es más elevado al inicio del proyecto. La certeza de terminar con éxito aumenta gradualmente a medida que avanza el proyecto.
- El poder que tienen los interesados en el proyecto para influir en las características finales del producto del proyecto y en el coste final del proyecto es más alto al comienzo y decrece gradualmente a medida que avanza el proyecto. La Figura 3 ilustra este hecho. Una de las principales causas de este fenómeno es que el coste de los



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

cambios y de la corrección de errores generalmente aumenta a medida que avanza el proyecto.

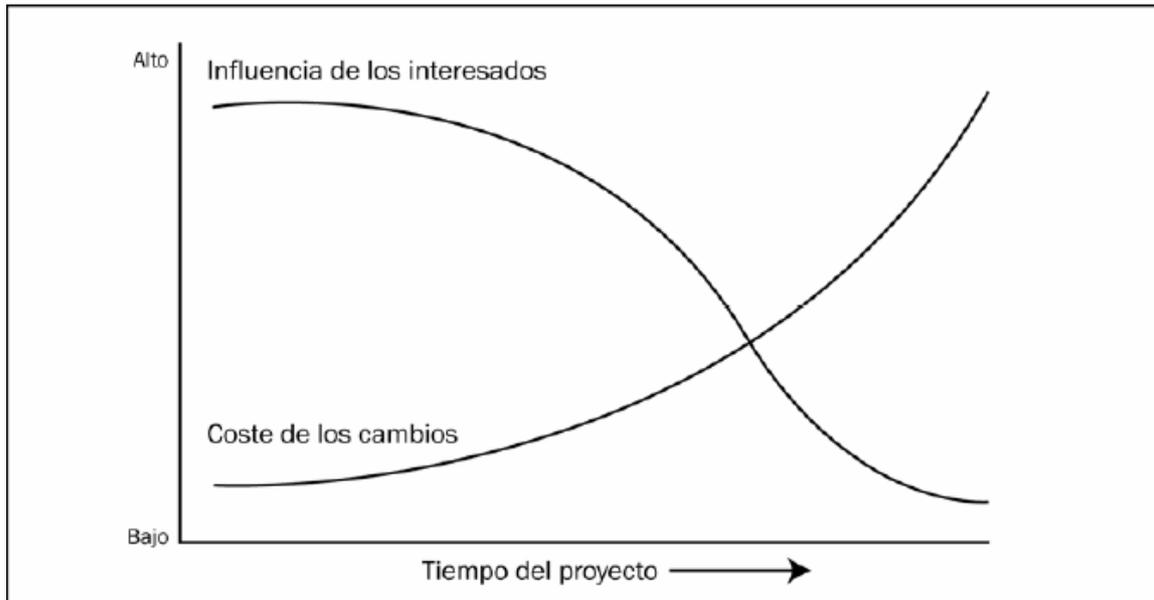
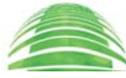


Figura 3. Influencia de los interesados a lo largo del tiempo

La mayoría de los proyectos tienen un ciclo de vida que consta de seis fases. Estas fases son el **concepto**, la **definición y planificación**, el **diseño**, el **desarrollo o construcción**, la **aplicación** y la **post-realización**.

Profundizando un poco más en estas etapas:

- Etapa de **concepto**. Es la etapa en la que comienza a gestarse la idea de la existencia de una necesidad que ha de ser satisfecha.
- Etapa de **definición y planificación**. En esta fase hay que determinar perfectamente que es lo que hay que hacer. Es necesario definir correctamente y completamente el problema a ser resuelto. Habrá que determinar los objetivos, la estrategia a seguir, identificar los recursos humanos que se le van a asignar, el sistema de control a seguir y los



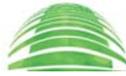
2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

procedimientos de aseguramiento de la calidad que se van a emplear.

- Etapa de **diseño**. Habrá que determinar o definir el método a seguir. En la etapa de diseño se llevará a cabo la ingeniería del proyecto, la revisión del diseño en caso de que el producto lo precise y el análisis de los objetivos de coste y resultados pretendidos.
- Etapa de **desarrollo o construcción**. Es la etapa en la que es llevado a la práctica el proyecto y completado el producto o servicio. En esta fase habrá que comprobar que efectivamente se hayan alcanzado los objetivos deseados.
- Etapa de **aplicación**. En esta etapa se pone en marcha el proyecto. Aquí todos los defectos hallados son fallos externos que detecta el cliente (el proyecto ha sido entregado) en cuyo caso habrá que tomar las medidas necesarias para el rediseño del mismo.
- Etapa **post-realización**. Durante la última fase se debe seguir observando y analizando el proyecto realizado para conocer posibles fallos o carencias, y que estos no sucedan en posteriores realizaciones. Hay que buscar un proceso de mejora continua. Es adecuado realizar una auditoría final que analice la ejecución de todo el proyecto a lo largo de su ciclo de vida.

2.2.3 Fases de un proyecto

Un concepto subyacente a la interacción entre los procesos de dirección de proyectos es el del ciclo planificar-hacer-revisar-actuar. Este ciclo está vinculado por los resultados; es decir, el resultado de una parte del ciclo se convierte en la entrada de otra. Vea la Figura 4.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

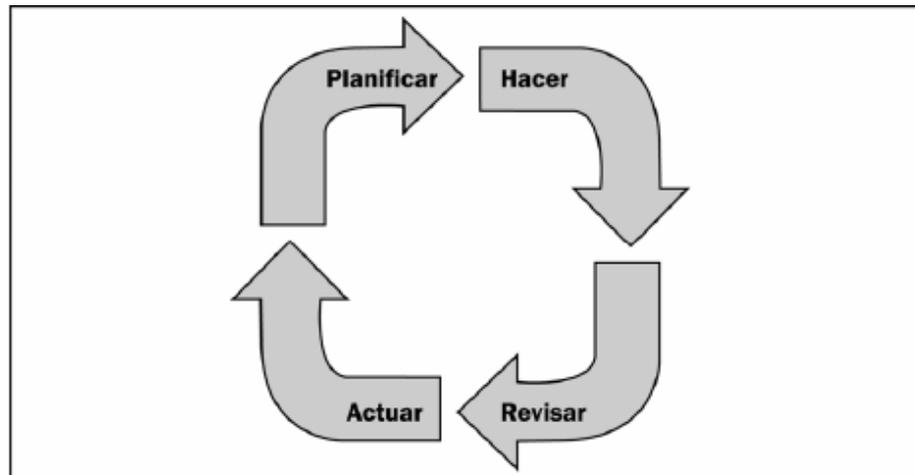
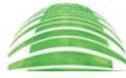


Figura 4. El Ciclo Planificar-Hacer-Revisar-Actuar

En una gestión proactiva de proyectos conviene determinar de forma especialmente cuidadosa dos fases diferenciadas en la vida de los proyectos en el ámbito operativo. La fase de planificación y la fase de control.

La **fase de planificación** es fundamental para alcanzar un flujo lógico en las actividades del proyecto:

- En primer lugar hay que crear la EDT, este es el proceso necesario para subdividir los principales productos entregables del proyecto y el trabajo del proyecto en componentes más pequeños y más fáciles de gestionar.
- Posteriormente es fundamental el establecimiento de la Secuencia de las Actividades, Es el proceso necesario para identificar y documentar las dependencias entre las actividades del cronograma.
- Estimación de la Duración de las Actividades. Es el proceso necesario para estimar la cantidad de períodos laborables que se

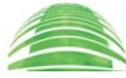


2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

requerirán para completar cada actividad del cronograma. Existirán actividades para las que su duración será conocida debido a que no exista incertidumbre en su desarrollo. Sin embargo lo más habitual será que la incertidumbre pueda actuar con lo cual la duración de cada actividad responderá a cierta aleatoriedad. En estas situaciones es habitual fijar un tiempo mínimo de ejecución de la actividad (bajo criterios optimistas), un tiempo máximo de realización de la actividad (bajo criterios pesimista) y, finalmente, un tiempo habitual o más probable para la ejecución de la actividad.

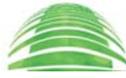
- Estimación de Costes. Es el proceso necesario para desarrollar una aproximación de los costes de los recursos necesarios para completar las actividades del proyecto.
- Existe una relación de dependencia entre el tiempo previsto para la realización de cada una de las tareas del proyecto, el número de recursos implicados en la ejecución de la tarea y el coste asociado a dicha tarea. De esta forma, lo que habrá que fijar será el conjunto de componentes recursos-tiempo-coste.
- Por último una vez se han definido toda esta serie de aspectos, se lleva cabo la secuenciación de las actividades del proyecto con el fin de establecer la cadena crítica del proyecto. La cadena crítica definirá el conjunto de actividades que determinarán las condiciones de ejecución del proyecto en tiempo, coste, recursos y calidad.

Hay que controlar si efectivamente la evolución del proyecto se está desarrollando conforme a lo previsto. A esta etapa se la denomina **fase de control** y su importancia es, cuanto menos, equivalente a la anterior. Así será necesario atender a todas las cuestiones siguientes:



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- La fase de control se inicia desde el momento en que se inicia la ejecución de las actividades conforme al plan previsto.
- Supervisar y Controlar el Trabajo del Proyecto. Es el proceso necesario para recoger, medir y difundir información sobre el rendimiento, y para evaluar las mediciones y tendencias para mejorar el proceso. Este proceso incluye el seguimiento de riesgos para asegurar que se identifiquen los riesgos de forma temprana, que se informe de su estado y que se ejecuten los planes de riesgos apropiados. El seguimiento incluye informes de estado, medición del avance y previsiones. Los informes de rendimiento proporcionan información sobre el rendimiento del proyecto respecto al alcance, cronograma, coste, recursos, calidad y riesgo.
- Control de Costes. Es el proceso de ejercer influencia sobre los factores que crean variaciones y controlar los cambios en el presupuesto del proyecto. Para ello resultan útiles herramientas del tipo PERT/costes.
- Finalmente un procedimiento de control de proyectos ideal, incluiría un sistema de tipo *tracing/tracking* permanente que permitiera conocer en tiempo real la situación y evolución prevista del proyecto. Con esto se podrían anticipar medidas que permitieran la ejecución de las actividades del proyecto de acuerdo a los compromisos adquiridos y el presupuesto disponible.
- Todos los aspectos anteriores deben estar adecuadamente incorporados en el Sistema de Información de la organización.
- Durante la fase de control, si fuera necesario, habría que realizar acciones correctoras y volver a establecer la planificación, de acuerdo con las variaciones producidas.



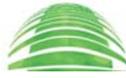
2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

2.3. Sistema integrado para la gestión de proyectos.

El sistema integrado de gestión de proyectos esta compuesto por una serie de elementos fundamentales en la organización del mismo. La figura 5 muestra los componentes generales de un sistema de gestión de proyectos:



Figura 5: Componentes del sistema de gestión de proyectos



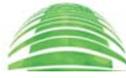
2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Las **relaciones humanas** aparecen en la base de la pirámide ya que sobre ellas se asientan todas los demás sistemas que conforman el conjunto completo. Dentro del sistema Humano hay que incluir la habilidad para negociar con los clientes y con los distintos grupos de trabajo, la capacidad de comunicar dentro de la organización para ayudar a comprender el porque de las decisiones y, también, de cara al exterior para mejorar la imagen de la organización y finalmente la capacidad de motivar a todos los componentes involucrados en el proyecto.

En el segundo nivel se encuentran tres sistemas. El **sistema de Cultura** recoge la cultura de la organización. Resulta de la combinación de un conjunto de efectos intangibles pero presentes como son valores éticos y democráticos, pero también de las creencias, actitudes, tradiciones y comportamientos de los miembros que conforman la organización. Dentro de este segundo nivel encontramos también el **sistema de Organización**. El fin de este sistema es el de coordinar los distintos esfuerzos involucrados en el proyecto. Por último en segundo nivel, el **sistema de Métodos** es necesario puesto que todo proyecto para su planificación y control necesita hacer uso de unas técnicas y metodologías que aseguren el trabajo bien hecho. Existen numerosas herramientas que forman parte del sistema de Métodos, ejemplos son PERT, CPM, ROY, GERT, VERT, etc.

En el tercer nivel encontramos dos sistemas. En primer lugar tratamos el **sistema de Planificación**. Sin un buen plan previo es imposible desarrollar con éxito la ejecución de un proyecto. Junto con el sistema de planificación, en el tercer nivel se encuentra el **sistema de Información**. Es necesario definir los protocolos que definan qué personas en qué situaciones deben recibir qué información.

Por último en la parte más alta de la pirámide se encuentra el **sistema de Control**. El control del proyecto es una de las principales responsabilidades en la gestión del proyecto, y ha de mantenerse presente para analizar posibles desviaciones sobre la marcha deseada del proyecto e intentar su reconducción.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

2.4. Modelo general para la gestión de proyectos

El modelo se presenta con voluntad de poder ser aplicable tanto a un proyecto de diseño, de investigación, de construcción, como de cualquier otro tipo. El modelo desarrollado es en forma de diagrama, y permite ir avanzando en el proceso lógico, el modelo aparece en la Figura 6.

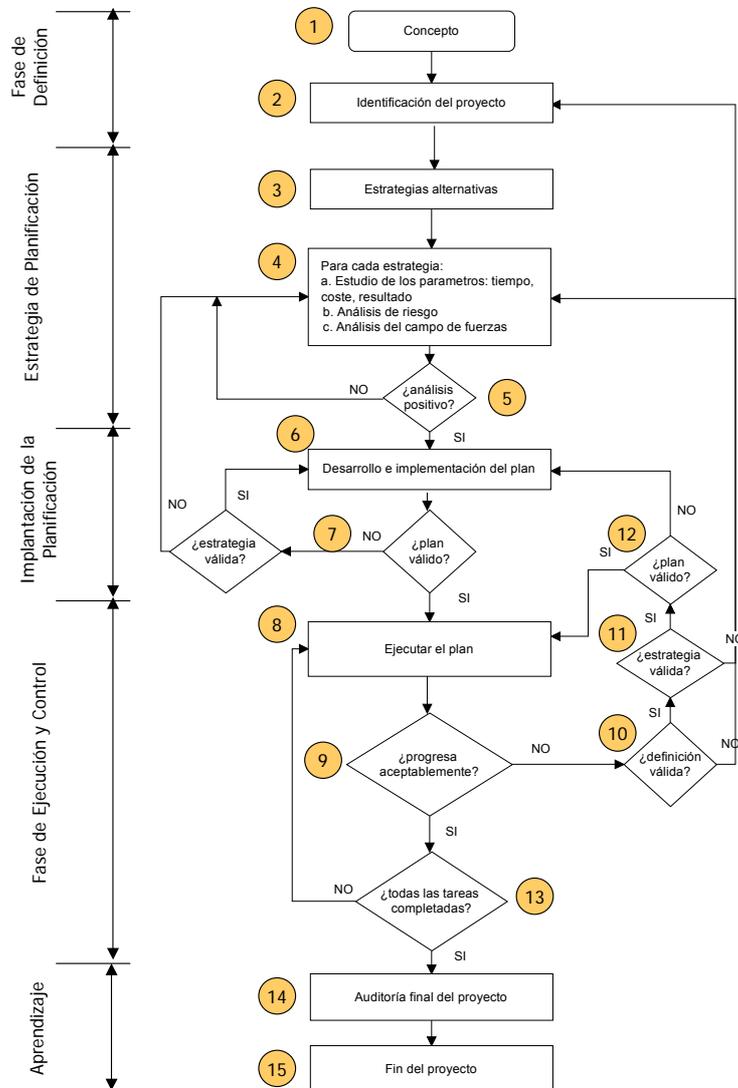
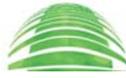


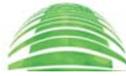
Figura 6. Modelo general para la gestión de proyectos



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

El modelo general se puede, por tanto, subdividir en 15 pasos.

- Paso 1. Donde se desarrolla el concepto genérico del proyecto.
- Paso 2. Se desarrolla la definición del problema, incluyendo la identificación de los trabajos a realizar.
- Paso 3. Se establecen las estrategias para llevar a cabo el proyecto. El riesgo principal de esta fase es suponer que solo existe una alternativa y consagrarlo todo (las opciones de éxito y fracaso) a ella.
- Pasos 4 y 5. Se valoran todas las estrategias. Además se analiza si los resultados son aceptables en relación con el sistema de Cultura de la organización. Se establece finalmente la estrategia por la que se opta.
- Paso 6. Es una de las etapas clave. En ella hay que establecer el plan de actuación para llevar a cabo realmente el proyecto.
- Paso 7. Se realiza la revisión del plan por el equipo de diseño y se determina finalmente la aceptación o rechazo.
- Pasos 8, 9, 10, 11, 12 y 13. El proyecto es llevado a cabo de acuerdo con la planificación efectuada, y los resultados se monitorizan para actuar durante la fase de control. En caso de apreciar desviaciones significativas de los resultados esperados se actúa para corregirlas.
- Paso 14. Cuando todas las tareas que integraban el proyecto han sido realizadas, un informe post-realización es muy adecuado con el fin de analizar los procedimientos empleados, revisar el trabajo llevado a cabo, y, con espíritu crítico, identificar aquellas cosas que serían susceptibles de mejora.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- Paso 15. El proyecto se cierra y se realizan los informes finales que permitan futuras referencias.

Tal y como señalábamos el paso 6 es una de las etapas clave que conviene detallar de forma específica. Esta etapa puede subdividirse en 8 subetapas a su vez, tal y como representa la figura 7.

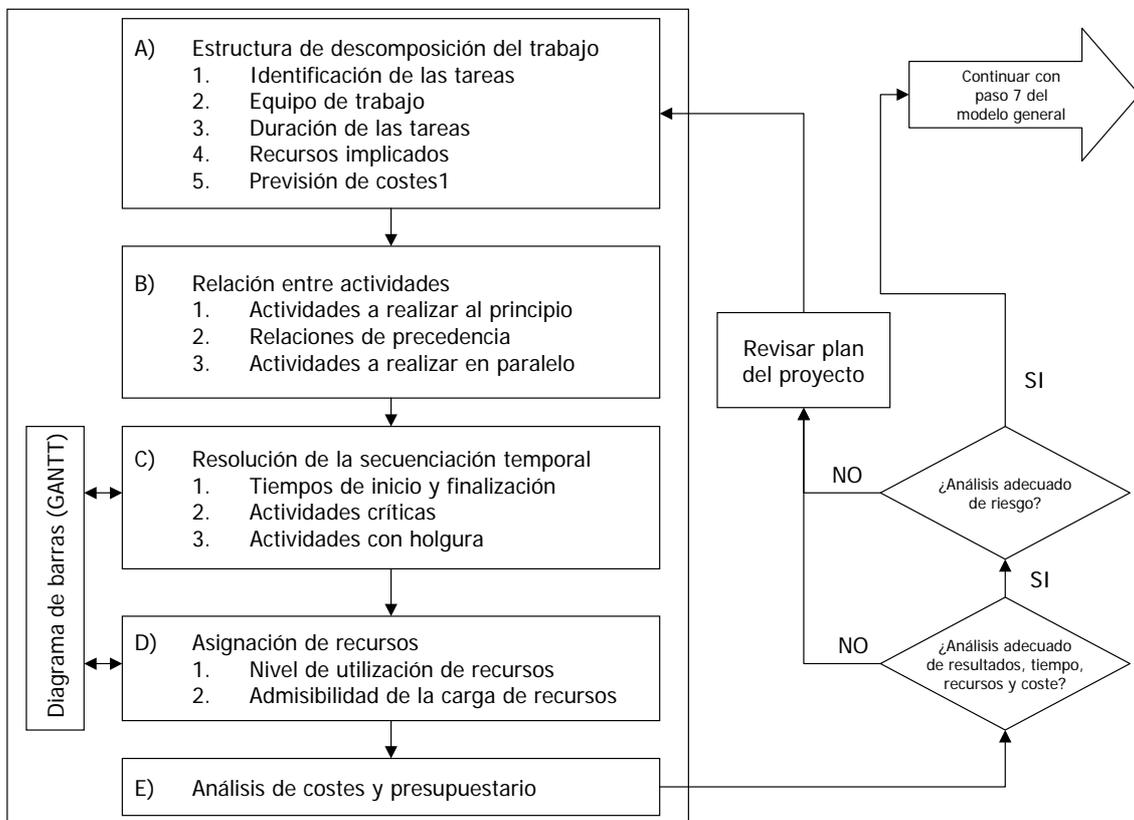
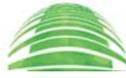


Figura 7. Desarrollos a realizar en el paso 6 del modelo general de gestión de proyectos

Las actuaciones asociadas a la Figura 7 se describen en las siguientes secciones.



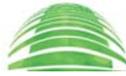
2.5. Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP)

La Estructura de Descomposición del Proyecto (**EDP**) es una técnica de descomposición funcional de las actividades y tareas del proyecto, plasmada en un listado de tareas organizadas en forma de diagrama jerárquico en árbol.

Su objetivo es reducir sistemáticamente la complejidad del proyecto, de forma que éste quede descompuesto en “fragmentos” constituidos por bloques de tareas (o paquetes de trabajo). Los bloques de tareas pueden subdividirse en tantos niveles como sea necesario, para alcanzar el nivel de detalle (descomposición) deseado. El nivel de división más pequeño debe ser suficientemente fino para permitir operar a nivel de tarea, aunque sin llegar a generar un volumen de tareas inmanejable.

Es posible estructurar los diferentes niveles del árbol EDP en cinco tipos jerárquicos: meta, objetivos, actividades, subactividades y paquetes de trabajo. Los pasos para establecer un diagrama de descomposición del proyecto son:

1. Establecer el nivel superior del árbol como nivel cero (**meta**).
2. Dividir el proyecto en sus **objetivos-funciones** principales de manera que el proyecto quede claramente definido.
3. Subdividir cada objetivo/función en las **actividades-sistemas** que es necesario desarrollar para alcanzarlo. Para su representación gráfica en el árbol, conviene asignar una frase concisa y descriptiva a cada actividad.
4. En el caso de que las actividades (sistemas) compuestas de dos o más características principales, subdividir las en las **subactividades (subsistemas)** correspondientes. El conjunto de todos los sistemas y subsistemas debe describir completamente la función/actividad situada en el nivel superior.
5. Proseguir sucesivamente, dividiendo cada elemento en celdas de menor nivel jerárquico, hasta que las subactividades (subsistemas) posean la complejidad necesaria para poder ser traducidas en **paquetes de trabajo**.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

6. Cada elemento (celda) de la EDP es inscrito mediante un código único. Estos identificadores se denominan **código de cuentas**.

Aunque la EDP se representa normalmente en forma de diagrama, no debe confundirse la técnica con la representación. Una lista de actividades sin la estructura adecuada, dibujada en forma de diagrama en árbol, no puede considerarse una EDP. El siguiente paso es crear el **diccionario** de la EDP, que consiste en dar una definición completa y unívoca de cada actividad, función, sistema o bloque de tareas a realizar en el proyecto.

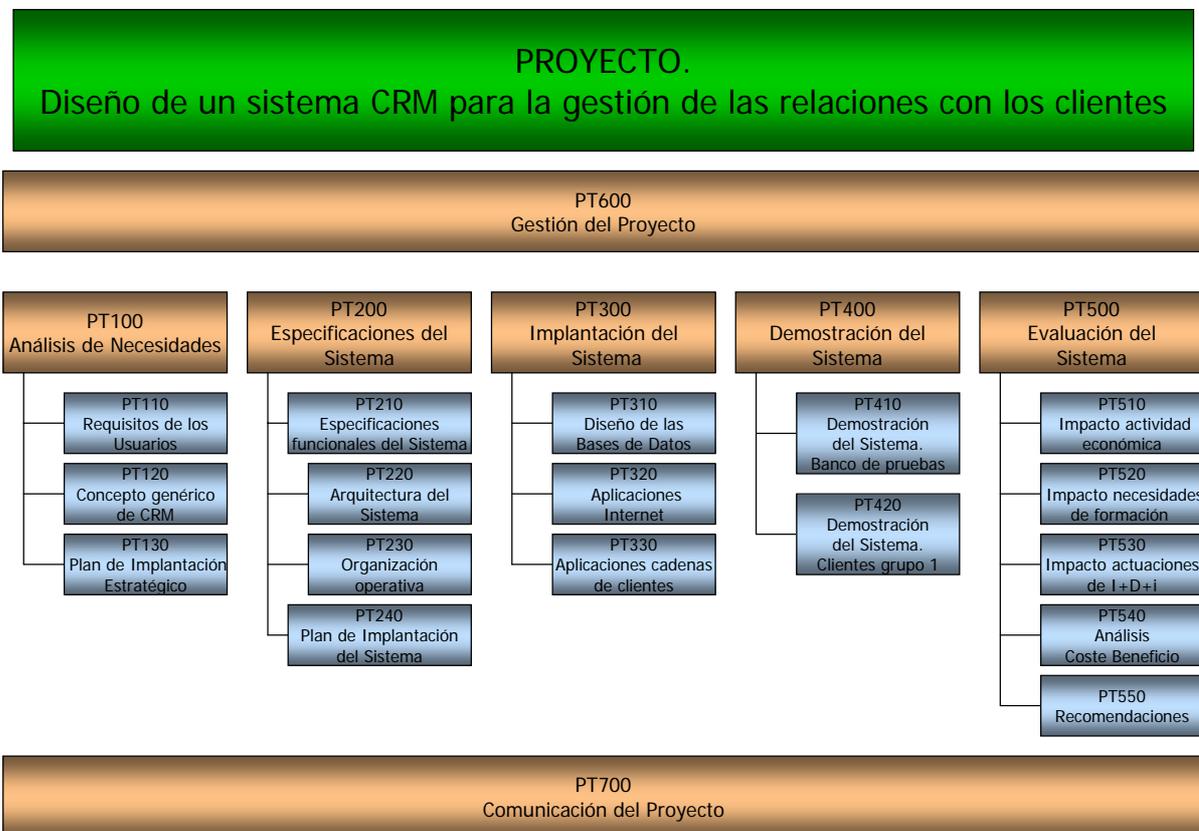
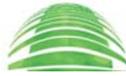


Figura 8: Ejemplo de Estructura de Descomposición del Proyecto.

Para cada casilla del árbol (diagrama) debe realizarse una descripción rigurosa de su naturaleza y propósito. Para aquellas casillas ya definidas en otros documentos del proyecto el diccionario puede limitarse a dar la referencia a los mismos. El objetivo principal del diccionario, es ofrecer una definición precisa y



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

actualizada del trabajo realizado (o por realizar), o que indique el lugar donde se puede encontrar dicha definición.

Por tanto, la estructura de descomposición del proyecto organiza y define el **alcance** completo del proyecto. Los trabajos que no estén especificados en la estructura de descomposición quedan fuera del alcance del proyecto. Al igual que el informe del alcance, la EDP se utilice a menudo para desarrollar y confirmar un entendimiento común del alcance del proyecto

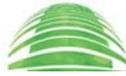
Una vez ha sido definida la estructura de paquetes de trabajo es necesario establecer el equipo de trabajo que desarrollará el paquete, indicando el responsable de la realización, así como las personas implicadas en cada una de las tareas. En la Figura 9 se puede ver un formulario de ejemplo para la especificación de responsabilidades. Se ha utilizado el PT300 de modelo para el establecimiento del análisis.

Proyecto: CRM	PT300. IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA	Hoja: 1 de 1
Responsable PT300	Ana Gil	Nombre fichero: PT300EQTR

Equipo de trabajo PT300. IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA						
TAREAS	Ana Gil	Luís Glez.	Juan Coto	Pedro Fdez.		
Diseño de las Bases de Datos	2	1	3			
Aplicaciones Internet	2	2	1	2		
Aplicaciones Cadenas de Clientes	1	3	2			

Códigos: 1: Responsable de desarrollo; 2: Soporte; 3: Informado del progreso; Blanco: no implicado

Figura 9. Formulario para la especificación de responsabilidades



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

De igual forma hay que definir y estimar la duración de las tareas, los recursos implicados y el coste previsto. La Figura 10 muestra a modo ejemplo la planificación del PT300 para el caso del diseño del CRM.

	Tiempo (días)	Recursos	Coste/día	Total
PT300 Implantación del Sistema				
PT310 Diseño de las Bases de Datos	90	Software Oracle	100 €	9000 €
PT320 Aplicaciones Internet	85	Licencias para Aplicaciones DHTML, XML, Java, Java Script y Asp	45 €	3825 €
PT330 Aplicaciones cadenas de clientes	65	-	20 €	1300 €
				TOTAL: 14125 €

Figura 10. Estimación de los valores asociados ala estructura de paquetes

Los datos de la anterior figura podrán ser utilizados de dos formas. Bien para prever los costes en que se incurra en el desarrollo del proyecto con el fin de poder establecer un presupuesto realista, en caso de que desarrollemos el proyecto para beneficio de nuestra organización. Bien para determinar el coste del desarrollo en caso de que estemos implantando el sistema para beneficio de otra organización, lo cual nos servirá para fijar el precio de la oferta. Este último caso responde al supuesto que se ha venido analizando.



2.6. Planificación temporal de las actividades de un proyecto

2.6.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

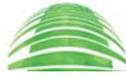
A finales de la década de 1950 se empieza a trabajar en la aplicación de la teoría de grafos, con apoyo de sistemas informáticos, a la gestión de proyectos.

En 1957, J. Kelly de la empresa de sistemas informáticos Remington Rand Corporation y M. Walker de la multinacional química Dupont de Nemours desarrollan el **Método del camino crítico** o **CPM** (Critical Path Method). El problema de la Dupont era mejorar los procedimientos de dirección de proyecto para la construcción de grandes plantas químicas.

Paralelamente, en 1958, la oficina de proyectos especiales de la Marina de Estados Unidos, para mejorar la gestión del proyecto POLARIS4, creó un equipo junto con personal del departamento de misiles balísticos de la Lockheed y de la consultora Booz, Allen y Hamilton, para desarrollar una técnica de control del proyecto, que permitiera reducir coste y plazo. El resultado fue la **Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos** o **PERT** (Program Evaluation and Review Technique), cuyo éxito inicial fue espectacular, ya que en el proyecto POLARIS permitió gestionar más de 9.000 empresas proveedoras (entre contratistas directos e indirectos) y se consiguió reducir en dos años la fecha prevista de conclusión del mismo.

Las dos metodologías, aunque tienen algunas diferencias importantes, son realmente muy similares, tanto por el empleo de grafos orientados como por su procedimiento operativo y por los resultados proporcionados. Parece ser que el equipo que creó el PERT tuvo acceso a los borradores del CPM.

En definitiva, las dos son técnicas reticulares de planificación y programación de proyectos, que permiten obtener la **duración mínima** del desarrollo de un proyecto a partir de la duración de las diferentes actividades que lo componen y de las relaciones de dependencia entre las mismas.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

2.6.2. MÉTODOS PERT Y CPM.

La primera fase de aplicación del método PERT es el denominado PERT-Tiempos, que permite calcular el tiempo total de ejecución del proyecto, a partir de los tiempos de las actividades que lo componen. Posteriormente, introduciendo la información de recursos, y en función del ritmo al que se pretende desarrollar el proyecto, es posible calcular el coste directo del mismo, mediante la extensión denominada PERT-Costes.

El método PERT se basa en la teoría de grafos para desarrollar la programación del proyecto, con el objetivo de optimizar (minimizar) su tiempo de ejecución.

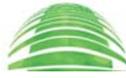
Para ello estudia las relaciones (dependencias) y condicionantes (calendarios, disponibilidad de recursos, restricciones externas, etc.) del conjunto de actividades que integran el proyecto. Los principales resultados que se obtienen tras la aplicación del método PERT son:

- El conjunto de tareas denominado **camino crítico** (o ruta crítica).
- La fecha de inicio más tardío admisible (tiempo más lejano), para cada actividad.
- La **holgura** o margen disponible para cada actividad o suceso.

Los sistemas PERT emplean un grafo orientado, denominado **red del proyecto**, para visualizar gráficamente las interrelaciones entre sus elementos. Sobre éste se realizan las operaciones que permiten calcular la ruta crítica, los tiempos más lejanos y las holguras.

Para aplicar el método PERT a un proyecto, es necesario seguir las etapas básicas del proceso de **planificación**, ya presentadas anteriormente, y que se resumen en:

1. Generar la lista de actividades (Por ejemplo, a partir de la EDT).
2. Establecer las relaciones entre las actividades.
3. Construir el grafo de actividades o **red del proyecto**.
4. Estimar los tiempos de ejecución de cada actividad.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

5. Utilizar el método PERT (propriadamente dicho).
 - 5.1. Calcular el tiempo más próximo en que podría iniciarse cada actividad.
 - 5.2. Calcular el **tiempo mínimo** de ejecución del proyecto, o lo que es lo mismo, el tiempo más próximo en que podría concluir la última actividad del proyecto.
 - 5.3. Calcular el tiempo más lejano en que podría concluir cada actividad.
 - 5.4. Calcular la holgura para cada suceso (inicio o fin de actividad).
 - 5.5. Calcular la holgura para cada actividad.
 - 5.6. Identificar el **camino crítico**.
 - 5.7. Analizar el resultado con el fin de minimizar, si fuera posible, la duración determinada.
6. Asignar recursos a cada actividad.
7. Calcular costes directos para cada actividad.
8. Definir los hitos principales e incluirlos en el plan del proyecto.

2.6.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL GRAFO DE ACTIVIDADES.

Para la representación gráfica del problema se utiliza un grafo formado por nodos y arcos (orientados). Se consideran dos opciones:

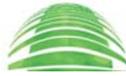
1. Representar las actividades en los nodos (AEN) y las relaciones de precedencia en los arcos.
2. Representar las actividades y relaciones de precedencia en los arcos (AEA), indicando los nodos el inicio y final de los trabajos.

Ambas representaciones son, como luego se vera, equivalentes.

En general PERT y CPM ha sido asociados con ambas formas de representación, si bien:

- PERT hace un mayor énfasis en los sucesos de iniciación y terminación de los trabajos (es decir en los nodos) y
- CPM en las actividades en sí (es decir en los arcos).

En adelante diferenciaremos entre las representaciones AEN y AEA. Se ha argumentado en favor de la representación AEN pues separa las actividades y



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

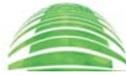
precedencias mediante nodos y arcos respectivamente, haciendo la representación más transparente.

Si las precedencias y las actividades van ambas en los arcos, son necesarias manipulaciones para señalar las precedencias.

Por ejemplo: Sean las actividades y relaciones de precedencia de la siguiente tabla.

Tabla 1. Ejemplo para la planificación temporal de un proyecto unitario. Relaciones de precedencia

Actividad	Precedentes
A	-
B	-
C	A
D	B y G
E	C y D
F	D
G	A
H	E



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Representando las actividades en los nodos (AEN) según la Figura 11.

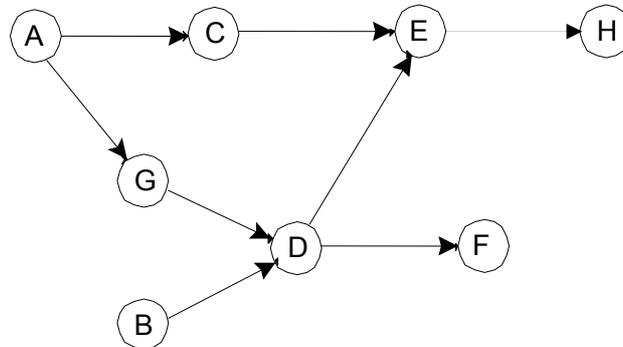


Figura 11. Representación AEN correspondiente al ejemplo de la Tabla 1.

Representando las actividades en los arcos (AEA), una representación tentativa podría ser la que muestra la Figura 12.

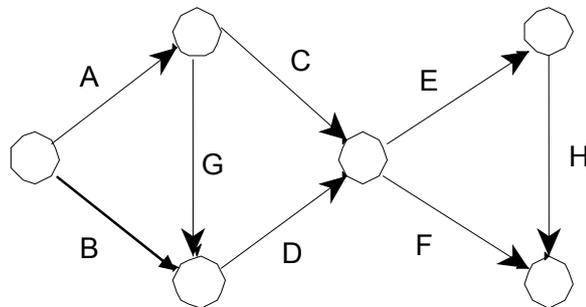
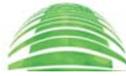


Figura 12. Representación AEA incorrecta correspondiente al ejemplo de la Tabla 1.

Que no es correcta, pues si bien E va detrás de C y D, F va sólo detrás de D; y no de C. Por lo que es necesario introducir una actividad ficticia para representar correctamente las precedencias de la tabla. Así se representa en la Figura 13.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

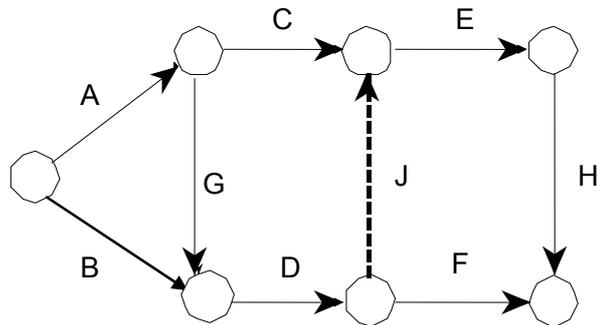


Figura 13. Representación AEA correspondiente al ejemplo de la Tabla 1.

Por esta razón los diagramas AEA son más complejos que los AEN, ya que cuando una actividad es precedida por todas las que terminan en un nodo, mientras que otra lo es sólo por algunas de ellas es necesario introducir actividades ficticias.

En cualquier caso, los grafos obtenidos tienen la peculiaridad de que no pueden contener ciclos de duración positiva, ya que esto representaría que una actividad se precede a sí misma, lo cual no tiene sentido.

En la representación AEA, para describir el grafo se numeran los nodos de forma que el arco (i,j) indique que $i < j$; para lo cual basta con numerar en sentido creciente a partir de los nodos tales que todos los arcos que en él se inician terminen en nodos sin numerar todavía. Así, para el caso anterior se tiene la numeración de la Figura 14.

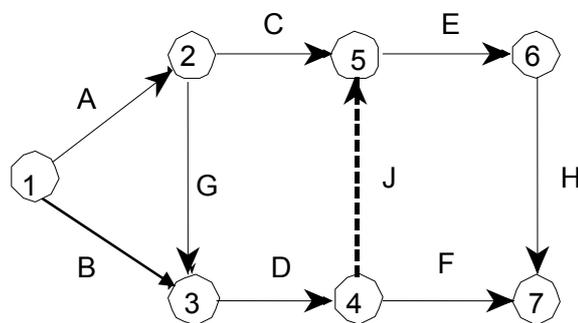
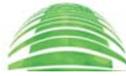


Figura 14. Numeración del grafo AEA



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

En los métodos de representación AEA, cada actividad está asociada con un par ordenado (i,j) . Por ello, no deben existir dos actividades asociadas al mismo par de nodos, si bien en un proyecto esto puede suceder.

Supongamos una nueva actividad K precedida por la D y sin que ella preceda a ninguna otra. Si representáramos las actividades como en la Figura 15.

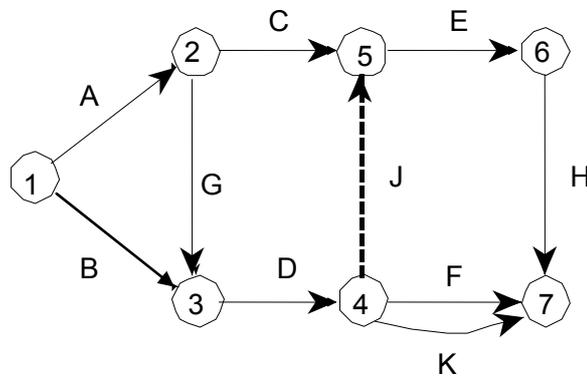


Figura 15. Incorporación de una nueva actividad K

Las actividades F y K corresponden ambas al par $(4,7)$, por lo que es necesario introducir otra actividad ficticia L, tal y como se realiza en la Figura 16.

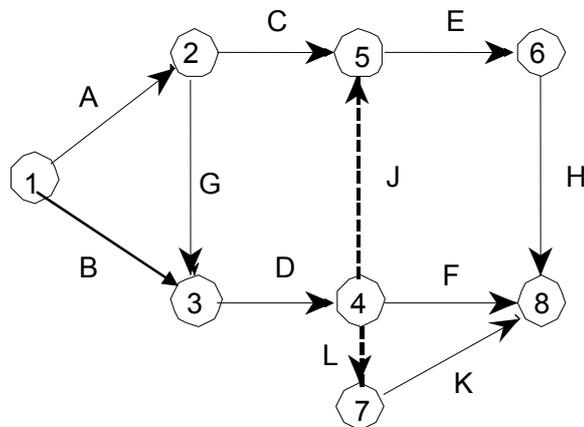
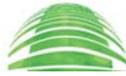


Figura 16. Representación AEA para el caso de una nueva actividad K



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Con la representación AEN sería:

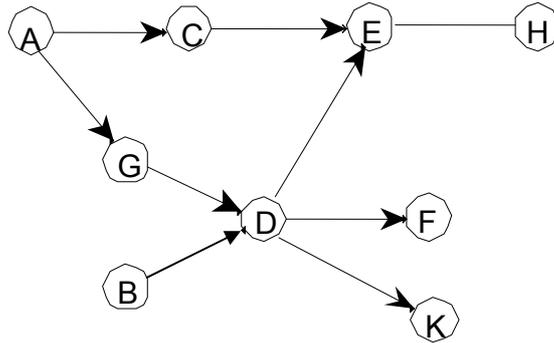
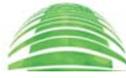


Figura 17. Representación AEN para el caso de una nueva actividad K

Por último, para normalizar la representación se incluye un nodo inicial de salida *s* y un nodo final de entrada *e*.

En la representación AEA, de *s* parten las actividades sin precedentes y en *e* terminan las que no preceden a ninguna otra; así:



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

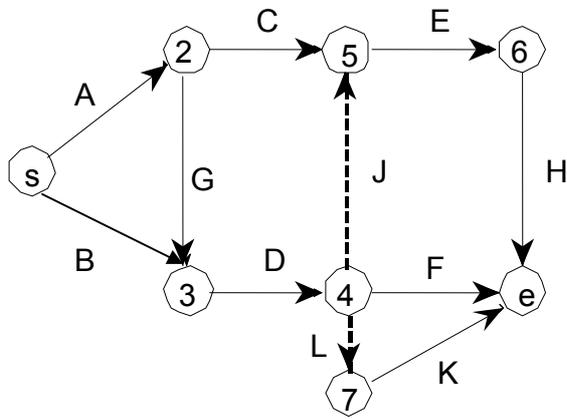


Figura 18. Representación completa AEA

Y en la representación AEN hubiera sido más simple su consideración, según muestra la Figura 19.

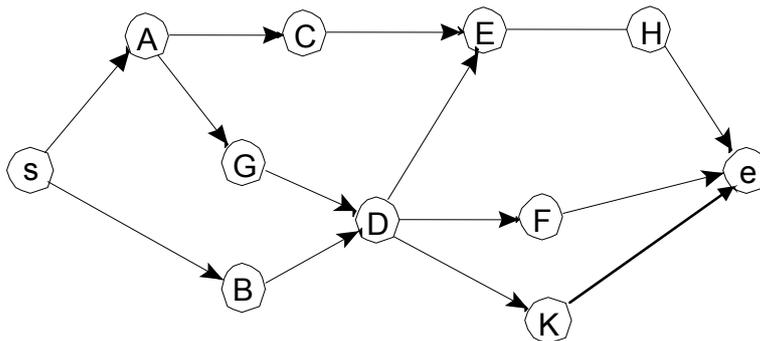
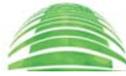


Figura 19. Representación completa AEN



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- el nodo s se interpreta como la actividad de duración nula que precede a las que no tienen precedentes, y
- el nodo e como la actividad de duración nula a la que preceden las que no eran precedente de ninguna otra.

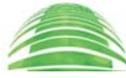
2.6.2.2 MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Haciendo uso de la notación AEA, se puede modelar la minimización del tiempo total de ejecución del proyecto en el grafo asociado $G = (N,A)$ mediante el envío de una unidad de flujo por el grafo desde el nodo de salida de flujo s hasta el nodo de entrada de flujo e .

Para ello, denominando d_{ij} al tiempo de ejecución de la actividad (i,j) se tiene el modelo:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} x_{ij} \\ & \text{s.a.} \\ & X(i,N) - X(N,i) = \begin{cases} 1, & \text{si } i = s \\ 0, & \text{en otro caso} \\ -1, & \text{si } i = e \end{cases} \quad \forall i \in N \\ & x_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

Que es un problema lineal cuyo óptimo indica la duración mínima del proyecto (viene dado por $\sum_{(i,j)} d_{ij}$ a lo largo del camino de duración máxima entre s y e).



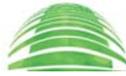
2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

En la representación AEN, llamando d_i al tiempo de ejecución de la actividad i , y acumulando en t_i el momento en que se puede iniciar la actividad i , en el grafo asociado $G = (N,A)$ resulta:

$$\begin{aligned} \min \quad & t_e \\ \text{s.a.} \quad & \\ & t_j \geq t_i + d_i, \quad \forall i \in A(j), \quad \forall j \in N \\ & t_j \text{ libre} \end{aligned}$$

Ambos problemas son duales, representando d_i y d_{ij} el mismo concepto de duración de la actividad. En el modelo primal, las variables representan los arcos que determinan la duración del proyecto, correspondiéndose con el problema de la ruta máxima. Las soluciones toman valores enteros 0 ó 1, toda vez que el espacio de restricciones del problema está definido por una matriz de incidencia nodo-arco que verifica la propiedad de unimodularidad.

En el problema dual, las variables determinan el tiempo más temprano en que se alcanza el evento definido por cada nodo, i . El objetivo es que el nodo e , fin del proyecto, se alcance lo antes posible. De ahí que se presente la función objetivo como minimizar t_e . En el modelo dual la definición de las variables t_i como libres obedece a la formulación del problema dual en forma asimétrica a partir de un modelo primal escrito con restricciones de igualdad. Una de las variables del dual puede fijarse libremente. En efecto, lo habitual es fijar una variable $t_s = 0$.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

“Tiempo más próximo” de una actividad.

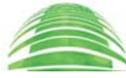
El tiempo más próximo para un evento es el tiempo (estimado), en el que ocurrirá el evento, si las actividades que lo preceden comienzan lo más pronto posible. Los tiempos más próximos se obtienen al recorrer el grafo de principio a fin, comenzando con los eventos iniciales y avanzando en el tiempo, hasta llegar a los eventos finales.

Para cada evento se hace un cálculo del tiempo en el que ocurriría, en el caso de que cada evento precedente inmediato ocurriera en su tiempo más próximo y cada actividad que interviene consumiera exactamente su tiempo estimado.

“Tiempo más lejano” de una actividad.

El tiempo más lejano para un evento es el último momento (estimado), en el que puede ocurrir dicho evento, sin retrasar la terminación del proyecto más allá de su tiempo más próximo. Los tiempos más lejanos de los eventos se obtienen sucesivamente al efectuar una pasada hacia atrás a través de la red, comenzando con los eventos finales y retrocediendo en el tiempo hasta llegar a los eventos iniciales.

Para cada evento se hace un cálculo del tiempo final en el que podría ocurrir un evento de manera que los que le siguen ocurrieran en su tiempo más lejano, y suponiendo que cada actividad involucrada consume exactamente su tiempo estimado.



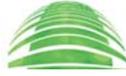
2.6.2.3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA PRIMAL MEDIANTE NOTACIÓN AEN

El algoritmo de resolución AEN establece el cálculo, para cada nodo o actividad, de los valores más temprano en que puede comenzar a realizarse la actividad, t_i , más temprano en finalizará la actividad, f_i , el tiempo más tardío en que podría comenzar a realizarse la actividad sin retrasar el proyecto, T_i , y el tiempo más tardío en que se podría finalizar la actividad sin que se retrase la entrega del proyecto, F_i .

t_i	f_i
T_i	F_i

De esta forma se cumple que $f_i = t_i + d_i$ y, por consiguiente, que $F_i = T_i + d_i$.

Para la obtención de los valores es necesario aplicar un algoritmo basado en dos rutinas de cálculo, una hacia delante para el cálculo de los tiempos más tempranos de inicio y finalización, y otra hacia atrás para el cálculo más tardío de inicio y finalización. Para la aplicación de ambas rutinas es adecuada (y necesaria en el caso de computación informática del algoritmo) la numeración creciente de los nodos del grafo.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Rutina de cálculo de tiempos más tempranos asociados a la actividad (rutina hacia delante)

Con ella se obtienen los instantes más tempranos de inicio y finalización de cada actividad.

Iniciar en $t_s = f_s = 0$

Calcular $t_j = \max_{i \in A(j)} \{t_i + d_i\} = \max_{i \in A(j)} \{f_i\}$, $\forall j \in N$, $j \neq s$

Hasta t_e

Rutina de cálculo de tiempos más tardíos asociados a la actividad (rutina hacia atrás)

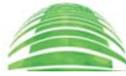
Una vez resuelta la rutina hacia delante y obtenidos los tiempos más tempranos de inicio y finalización de cada actividad, se procede a calcular los tiempos más tardíos de inicio y finalización de cada actividad.

Iniciar en $T_e = t_e$

Calcular $T_j = \min_{k \in D(j)} \{T_k - d_j\}$, $\forall j \in N$, $j \neq e$, o bien $F_j = \min_{k \in D(j)} \{T_k\}$, $\forall j \in N$, $j \neq e$

Hasta T_s

Para el ejemplo anterior, supóngase que los tiempos de ejecución de las actividades que componen el proyecto son las de la Tabla 2.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Tabla 2. Tiempos de ejecución y relaciones de precedencia de las actividades del proyecto

Actividad	Precedentes	Duración
A	-	5
B	-	10
C	A	4
D	B y G	8
E	C y D	4
F	D	10
G	A	7
H	E	5
K	L	7

La resolución del problema viene dado por el grafo de la Figura 20.

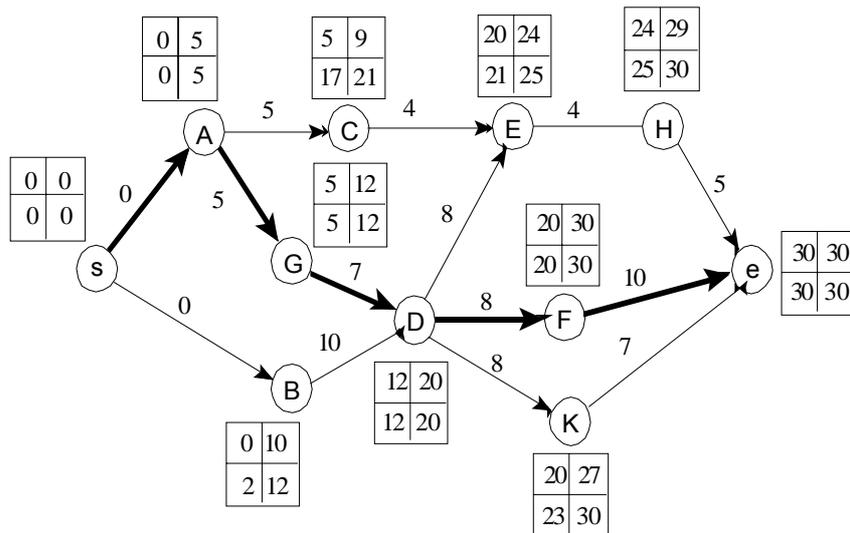
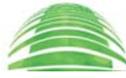


Figura 20. Resolución del PERT tiempos mediante notación AEN



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Donde se ha señalado mediante línea de trazo grueso a aquellas actividades que han de realizarse sin demora, pues su retraso supondría un retraso en la entrega del proyecto por lo tanto son actividades que carecen de holgura. Para el resto de actividades se observan márgenes sobre las fechas de inicio y terminación de la actividad. Así se define:

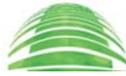
- Holgura total(H_i) como el margen más favorable de tiempo en la realización de una actividad. Se calcula $H_i = T_i - t_i = F_i - f_i$.
- Holgura libre (h_i) cómo el máximo plazo de tiempo que se puede retrasar el inicio de una actividad sin que se retrase el comienzo de las siguientes. Se calcula de la forma $h_i = \min_{k \in D(i)} \{t_k\} - f_i$

Siempre se cumple que $H_i \geq h_i$, $\forall i \in N$. Cuando ambas son nulas la actividad es crítica.

La **ruta crítica** (o camino crítico) del proyecto es una secuencia ininterrumpida de actividades, cuyas actividades tienen todas **holgura total nula**, que partiendo del evento inicial termina en el evento final. La duración de la ruta crítica es la mayor duración entre dos sucesos del proyecto, e indica el **tiempo mínimo** necesario para desarrollarlo.

La ruta crítica tiene una gran importancia, debido al hecho de que cualquier retraso en cualquiera de las actividades de la misma, provoca un retraso en el total del proyecto. Mientras en el resto del proyecto es posible tolerar alguna demora (siempre que no sea superior a la holgura de la actividad correspondiente), ello no es posible en la ruta crítica.

Por tanto, la determinación de la ruta crítica resulta fundamental para evaluar el impacto sobre el proyecto debido al retraso en una tarea concreta, y para priorizar las asignaciones de recursos, tanto en la etapa de ajuste de la programación como, una vez iniciada la realización del proyecto, en las etapas de seguimiento y control.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

En el ejemplo, las holguras serían las que muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de las holguras totales y libres del ejemplo

Actividad	Holgura total	Holgura libre	Crítica
A	0	0	*
B	13	2	
C	12	11	
D	0	0	*
E	1	0	
F	0	0	*
G	0	0	*
H	1	1	
K	3	3	

Las actividades críticas son A, D, F y G. Nótese que las actividades terminales tienen la misma holgura total que libre.

2.6.2.4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA PRIMAL MEDIANTE NOTACIÓN AEA

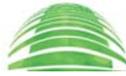
Rutina de cálculo de tiempos más tempranos asociados al evento de inicio de la actividad (rutina hacia delante)

Con ella se obtiene el instante más temprano de inicio de cada actividad.

Iniciar en $t_s = 0$

Calcular $t_j = \max_{i \in A(j)} \{t_i + d_{ij}\}$, $\forall j \in N$, $j \neq s$

Hasta t_e



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Rutina de cálculo de tiempos más tardíos asociados al evento de inicio de la actividad (rutina hacia atrás)

Una vez resuelta la rutina hacia delante y obtenidos los tiempos más tempranos de inicio y finalización de cada actividad, se procede a calcular los tiempos más tardíos de inicio y finalización de cada actividad.

Iniciar en $T_e = t_e$

Calcular $T_j = \min_{k \in D(j)} \{T_k - d_{jk}\}, \forall j \in N, j \neq e$

Hasta T_s

Siendo $D(j)$ el conjunto de nodos k posteriores al j conectados mediante arcos (j,k) . Para el ejemplo anterior de la Tabla 2, los resultados mediante notación AEA se aprecian en la Figura 21:

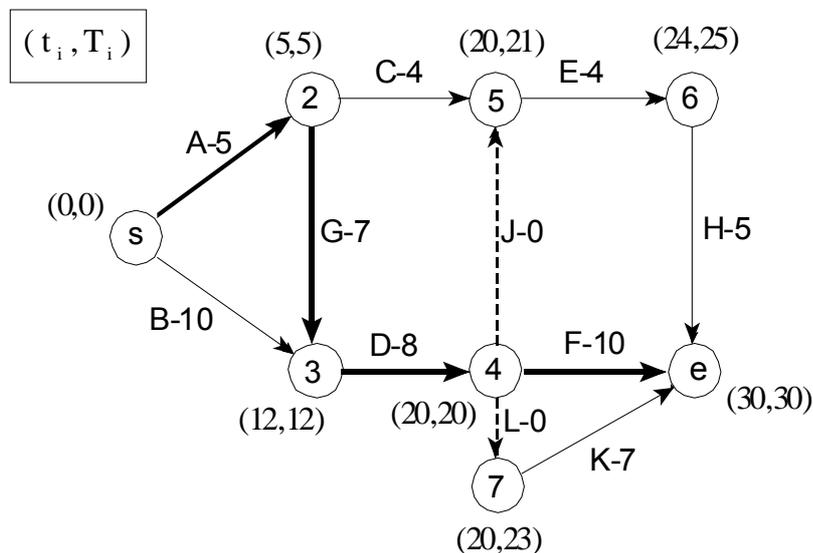
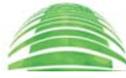


Figura 21. Resolución del PERT tiempos mediante notación AEA



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

En definitiva, toda la información necesaria no se mantiene en los nodos con la representación AEA. Si empleamos la notación t_{ij} para el instante más temprano para iniciar la actividad (i,j) y T_{ij} para el más tardío se tiene que:

$$t_{ij} = t_i \text{ y } T_{ij} = T_j - d_{ij}$$

Además, para las actividades ficticias, el hecho de que, por ejemplo, $t_{47} = 23$ y $T_{47} = 23$ no indica que sea la actividad L la que tiene ese margen de tiempo, sino que esos valores se deberán trasladar a la actividad K: $t_{7e} = 20$ y $T_{7e} = 23$.

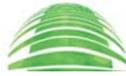
2.6.3. SEGUIMIENTO DE PROYECTOS

El **seguimiento** o verificación del plan consiste en comprobar si los resultados obtenidos coinciden con los objetivos previstos. Se analiza si para cada tarea finalizada se ha empleado el tiempo programado. Las desviaciones en las tareas programadas se traducen en las correspondientes desviaciones en el coste real frente al presupuestado.

El proceso de seguimiento se realiza de forma periódica, para detectar los problemas y divergencias que puedan surgir, con objeto de adoptar medidas correctoras o de **control** para reconducir el desarrollo del proyecto.

El **plan de seguimiento** es una herramienta para formalizar el proceso de seguimiento (en el que se comprueba la concordancia entre desarrollo y previsión). Así mismo el plan establece la elaboración de una serie de **informes** periódicos. También se prevé la comunicación bidireccional con el plan de control de cambios, con el fin de actualizar las previsiones y reflejar en aquél las acciones de control decididas tras el proceso de revisión.

Estos métodos también están dirigidos al control y seguimiento del proyecto incluyendo la posibilidad de revisar la situación real en la que se encuentra su ejecución. Esta revisión requiere las siguientes modificaciones en el grafo original:



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

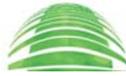
1. Introducir una actividad previa a la de salida s cuya duración sea el tiempo desde la iniciación del proyecto hasta el momento de la revisión.
2. La duración de todas las actividades realizadas pasa a ser cero.
3. Modificar la duración de las actividades restantes de la siguiente forma:
 - Aquellas que se han realizado parcialmente se les asigna una duración igual al tiempo que reste para finalizarlas.
 - Los conocimientos adquiridos pueden aconsejar la modificación de las no iniciadas todavía.
4. Resolver el grafo así modificado calculando el camino crítico, las holguras, etc.

Para ilustrar el procedimiento, supóngase que se hace una revisión al cabo de 10 días de iniciado el proyecto del ejemplo anterior, encontrándose en la siguiente situación que refleja la Tabla 4.

Tabla 4. Seguimiento de proyecto: situación del proyecto una vez transcurridos 10 días

Actividad	A	B	C	D	E	F	G	H	K
Situación	Terminada	Terminada	Terminada	Sin Iniciar	Sin Iniciar	Sin Iniciar	Incompleta	Sin Iniciar	Sin Iniciar
Nuevo estado	-	-	-	8	5	9	Restan 3	4	8

La situación del proyecto y la nueva estimación de tiempos se calcula empleando notación AEN, y se aprecia en la Figura 22.



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

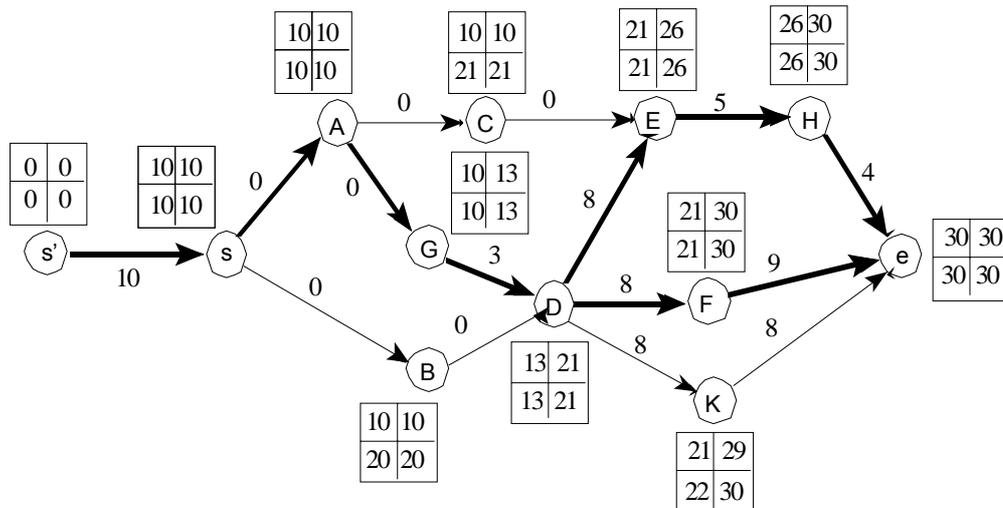
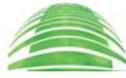


Figura 22. Nuevos resultados de la planificación temporal tras el seguimiento de proyecto

Con respecto a la planificación inicial, todavía se espera acabar el proyecto en 30 días, pero las actividades críticas son A - G - D - F - E - H. Como se puede observar, las actividades E y H han pasado a ser críticas, habiendo aparecido un segundo camino crítico. Por tanto, la situación ha empeorado en el sentido de haber más actividades cuyo retraso implica el retraso del proyecto total.

Las holguras han variado, de las actividades todavía por realizar sólo tiene holgura positiva la K, siendo $h_K = 30 - 29 = 1$.



2.7. Estimaciones deterministas y aleatorias

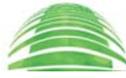
Hasta aquí siempre se ha supuesto que es posible conocer con una precisión adecuada el valor de la **estimación de la duración** de una actividad. Sin embargo, en muchos proyectos reales (sobre todo en los proyectos de carácter novedoso y/o en los que aparecen tareas de investigación) existe una incertidumbre considerable sobre cuáles serán estos tiempos. Por tanto, es posible darles el tratamiento de una variable aleatoria, cuyo comportamiento podrá aproximarse a una determinada distribución de probabilidad, en función de las características de la actividad en concreto.

Los métodos deterministas como el CPM sólo emplean un valor para estimar el tiempo de ejecución de cada actividad, suponiendo que se ajusta a la realidad, analizando el proyecto bajo este supuesto.

El método PERT aborda el problema de la incertidumbre en el cálculo de las duraciones solicitando al planificador que realice tres tipos diferentes de estimaciones para los tiempos de las actividades, con el fin de obtener una información de partida para elaborar una estimación de la duración total del proyecto, e incluso para realizar un cálculo de la probabilidad de terminar el proyecto en una fecha programada. Las tres estimaciones empleadas por la técnica PERT para cada actividad son denominadas de la siguiente forma:

- Estimación más probable (**m**)
- Estimación optimista (**a**)
- Estimación pesimista (**b**)

La estimación **más probable** intenta ser la estimación más realista (más probable) del tiempo que puede consumir una actividad. En términos estadísticos, es una estimación de la **moda** de la distribución de probabilidad para el tiempo de la actividad. La estimación **optimista** procura determinar el tiempo (poco probable, pero sí posible) en que se desarrollaría la actividad en caso de que todo funcionara bien. Por tanto, se trata de una estimación de la **cota inferior** de la



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

distribución de probabilidad. Por último, se intenta que la estimación **pesimista** sea el tiempo (poco probable, pero sí posible) en que se realizaría la actividad en caso de que todo fuera mal. En términos estadísticos se trata de una estimación de la **cota superior** de la distribución de probabilidad.

A partir de estas previsiones, el método PERT asume dos hipótesis fundamentales para calcular un **valor esperado** y una **varianza** para la distribución de probabilidad que seguiría la variable aleatoria **duración** del proyecto. La primera suposición es que la desviación estándar (raíz cuadrada de la varianza), es igual a un sexto del intervalo de los requerimientos de tiempo razonablemente posibles, esto es:

$$\sigma = \frac{b - a}{6}$$

Para obtener una estimación del valor esperado de un proyecto, también es necesario hacer una suposición sobre la forma de la distribución de probabilidad. El método PERT propone que la mayoría de actividades se pueden asimilar a una distribución de tipo **beta**.

$$f(t) = K \cdot (t - a)^\alpha \cdot (b - t)^\beta$$

A partir de esta hipótesis se realiza una aproximación para la duración de cada actividad basada en la siguiente ponderación: un sexto para la cota inferior, un sexto para la cota superior, y dos tercios para la moda. Expresado analíticamente, se tiene:

$$\mu = \frac{a + 4m + b}{6}$$

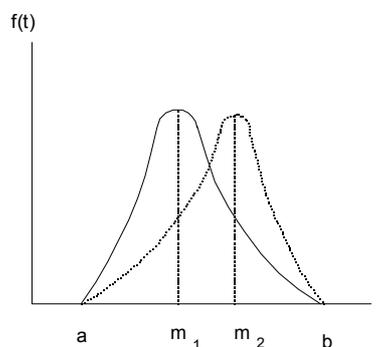
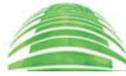


Figura 23. Función de distribución Beta de Euler y sus principales parámetros



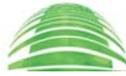
2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Considerando que cada camino que conecta en el grafo el nodo de salida, s , con el de entrada, e , es una variable aleatoria P_i , se supone la hipótesis de que P_i se distribuye según una normal de media la suma de las medias de los tiempos de ejecución de las actividades que componen el camino P_i ; y de varianza la suma de las varianzas (de las actividades que componen el camino P_i). Esta hipótesis puede considerarse adecuada si las actividades son independientes y el número de ellas es elevado, lo cual no sucede en muchos casos.

Tabla 5. Datos para la planificación de un proyecto con actividades de duración aleatoria de acuerdo a la distribución Beta de Euler.

Actividad	Predecesor	Estimaciones (a , m , b)	Media	Desviación Típica
A	-	2 , 4 , 12	5	10/6
B	-	3 , 11 , 13	10	10/6
C	A	0 , 4.5 , 6	4	1
D	B y G	6 , 7 , 14	8	8/6
E	C y J	0 , 3 , 12	4	2
F	D	7 , 10 , 13	10	1
G	A	3 , 6 , 15	7	2
H	E	1 , 2.5 , 19	5	3
J	D	0 , 0 , 0	0	0
K	L	2 , 7 , 12	7	10/6
L	D	0 , 0 , 0	0	0

Como las medias aproximadas coinciden con los tiempos de ejecución anteriores, los resultados siguen siendo válidos (Figura 23).



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

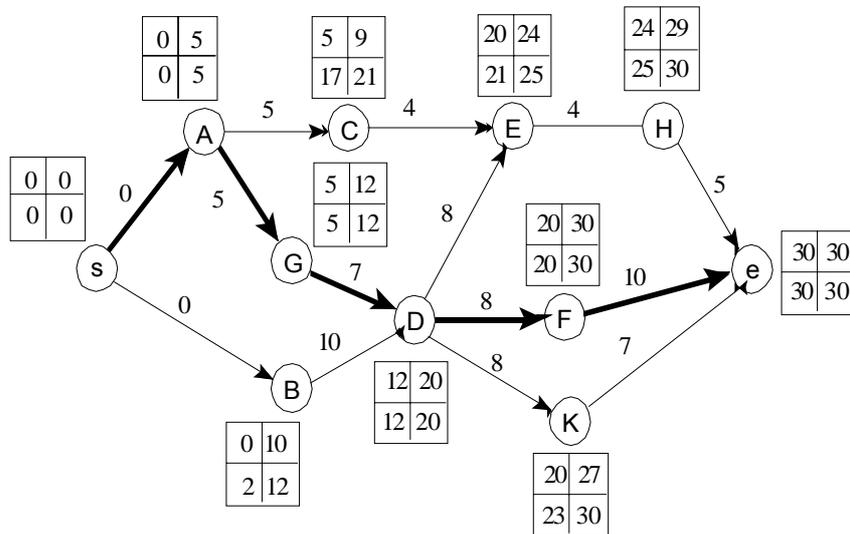


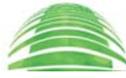
Figura 24. Resolución de la duración media del proyecto

El camino crítico es el formado por las actividades A-G-D-F. Denominando a este camino P_1 y suponiendo que la aproximación normal es válida, su media es $\mu_1 = E(P_1) = 30$, y su desviación tipo es $\sigma_1 = 3,1$.

Sin embargo, el camino $P_2 = \{A-G-D-J-E-H\}$ tiene de media $\mu_2 = E(P_2) = 29$ y de desviación típica $\sigma_2 = \text{VAR}(P_2) = 4,6$. De donde se deduce que las probabilidades de satisfacer un tiempo de terminación del proyecto serán sobreestimadas si sólo se considera la variable aleatoria P_1 pues P_2 puede pasar a ser crítica fácilmente. Por tanto, resulta aventurado sacar conclusiones de tipo probabilístico en un grafo de un proyecto aplicando estas reglas.

Así pues, partiendo de una representación AEN, el algoritmo PERT tiempos probabilístico constaría de los siguientes pasos para un grafo $G=(N,A)$.

1. Calcular la duración media y la varianza de cada actividad del grafo suponiendo que las variables tiempos de ejecución se distribuyen según una distribución Beta de Euler, es decir:



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

$$\left. \begin{aligned} \mu_i &= \frac{a_i + 4m_i + b_i}{6} \\ \sigma_i &= \frac{b_i - a_i}{6} \end{aligned} \right\}, \quad \forall i \in N$$

2. Con las duraciones medias μ_i calculadas, determinar los instantes más temprano y más tardío de comienzo y finalización de cada actividad así como los caminos críticos, utilizando el algoritmo de tiempos deterministas.

$$t_i^*, f_i^*, T_i^*, F_i^*, \forall i \in N, \text{ y los caminos críticos } CC_i$$

3. Calcular:

$$\sigma_{CC_i}^2 = \sum_{i \in CC_i} \sigma_i^2$$

Siendo $i \in CC_i$ el conjunto de actividades pertenecientes al camino crítico I (téngase en cuenta que puede haber varios). Determinar:

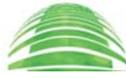
$$\sigma^2 = \max_i \{ \sigma_{CC_i}^2 \}$$

4. La probabilidad de que el proyecto se termine en el instante x es:

$$P(t_e \leq x) = N_k(0,1), \text{ siendo } k = \frac{x - t_e^*}{\sigma}$$

Siendo $N_k(0,1)$ la función de distribución de la normal centrada en el origen. La probabilidad de que el proyecto termine después del instante x sería:

$$P(t_e \geq x) = 1 - P(t_e \leq x) = 1 - N_k(0,1)$$



2.8. COMPARACIÓN ENTRE PERT Y CPM.

Como ya se ha dicho, estas dos técnicas son muy similares ya que comparten un mismo planteamiento. En resumen, ambas parten de una red de proyecto que representa las relaciones de precedencia entre actividades. Sobre la misma se incorporan las estimaciones de tiempo para las actividades, se calculan los tiempos más próximos y más lejanos, la duración mínima del proyecto, las holguras y la ruta crítica. Sin embargo poseen una serie de diferencias significativas, que se resumen de la siguiente forma:

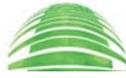
2.8.1. Topología de la red de proyecto.

Como se ha explicado, la red PERT representa las actividades mediante arcos, por lo que los nodos son sucesos iniciales y/o finales de actividad. En cambio, la red **CPM** utiliza el enfoque habitual en Investigación Operativa, que suele representar las **actividades en los nodos**, quedando los arcos como elemento para establecer las relaciones entre las mismas. Esto implica que la red CPM es mucho más simple que la PERT, ya que desaparecen los problemas de indefinición y se **evita** la necesidad de utilizar actividades **ficticias**.

El motivo para que PERT no use la representación habitual (y natural) en la teoría de grafos, se debe al hecho de que representando las actividades sobre los arcos resulta más **intuitivo** el esquema del proyecto, sobre todo si se parte de un diagrama de Gantt.

2.8.2. Determinismo frente a aleatoriedad en los tiempos de tarea.

Tal como se ha explicado, el método PERT asume que los tiempos de actividad siguen variables aleatorias, cuyo comportamiento puede asimilarse a una distribución de probabilidad de tipo beta, definida por tres parámetros (las estimaciones optimista, pesimista y más probable). Debe recordarse que el PERT nace como herramienta de planificación en un proyecto con una importante componente de I+D. Por otra parte, el CPM supone las actividades de duración



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

fija. Debe recordarse que tiene su origen en la planificación de proyectos de construcción, en los que la experiencia permite realizar estimaciones razonablemente precisas de la duración de las tareas.

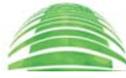
2.8.3 Criterio para determinar la duración de una actividad.

Se acaba de ver el diferente enfoque determinista/probabilista entre CPM y PERT. Pero no acaba ahí la diferencia existente entre ambos métodos al respecto de la estimación de tiempos, ya que en ella aparece implícita la consideración de la cantidad de recursos que van a utilizarse para la ejecución de una tarea.

El método PERT asume que la duración de la tarea (tanto la estimación optimista, pesimista como la más probable) se calcula considerando que se dispone de todos los recursos necesarios para desarrollarla, al menos con el procedimiento, tecnología y herramientas que la organización (persona, equipo, empresa, etc.) emplea habitualmente. Por tanto, no procede correlacionar el tiempo de ejecución de la tarea con el empleo de un mayor o menor número de recursos (mayor o menor coste).

Sin embargo el CPM asume una duración de tarea fija, pero para un determinado nivel de uso de recursos, estableciendo una correlación lineal entre el tiempo y el coste de realización de la tarea.

La justificación de esta diferencia también puede deberse al origen y enfoque inicial de ambos métodos. Mientras el objetivo fundamental del PERT era optimizar los plazos en un proyecto con un elevado nivel de incertidumbre, el CPM pretendía optimizar simultáneamente plazo y coste del proyecto, por lo que la extensión del método a la programación de recursos resulta imprescindible.



2.9. Diagramas de Gantt

Los diagramas de Gantt fueron definidos por Harry L. Gantt en 1918. Tienen como objetivo la representación del plan de trabajo, mostrando las tareas a realizar, el momento de su comienzo y su terminación y la forma en que las distintas tareas están encadenadas entre sí.

Descripción

El gráfico de Gantt es la forma habitual de presentar el plan de ejecución de un proyecto, recogiendo en las filas la relación de actividades a realizar y en las columnas la escala de tiempos que se está manejando, mientras la duración y situación en el tiempo de cada actividad se representa mediante una línea dibujada en el lugar correspondiente.

Notación

- Es un Modelo realizado sobre ejes de coordenadas, donde las tareas se sitúan sobre el eje de ordenadas (y) y los tiempos sobre el de abscisas (x).
- Cada actividad se representa con una barra limitada por las fechas previstas de comienzo y fin.
- Las actividades se agrupan en fases y pueden descomponerse en tareas.
- Cada actividad debe tener recursos asociados.
- Los HITOS son un tipo de actividad que no representa trabajo ni tiene recursos asociados.
- Las actividades se pueden encadenar por dos motivos:



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

- Encadenamiento funcional o por prelación. (Ej.: un programa no puede probarse hasta que haya sido escrito).
- Encadenamiento orgánico o por ocupación de recursos. (Ej.: un programador no puede empezar un programa hasta que haya terminado el anterior).

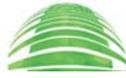
Pueden realizarse actividades en paralelo siempre que no tengan dependencia funcional u orgánica.

El diagrama de Gantt es una herramienta útil que, además de poseer un alto contenido estético, permite transmitir de forma clara, rápida y precisa, información sobre la secuenciación de las tareas que conforman el proyecto objeto de estudio. Así mismo en el caso de actividades con holgura, representa los valores correspondientes a las holguras totales de las distintas tareas.

A continuación se muestra el diagrama de Gantt correspondiente a la Tabla 6 de actividades, correspondiente al ejemplo anteriormente introducido en el capítulo de actividades de duración aleatoria.

Tabla 6. Ejemplo de tabla de actividades incluyendo relaciones de precedencia, duración y holguras

Actividad	Precedente	Duración	Holgura
A	-	5	0
B	-	10	2
C	A	4	12
D	B y G	8	0
E	C y J	4	1
F	D	10	0
G	A	7	0
H	E	5	1
K	L	7	3



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

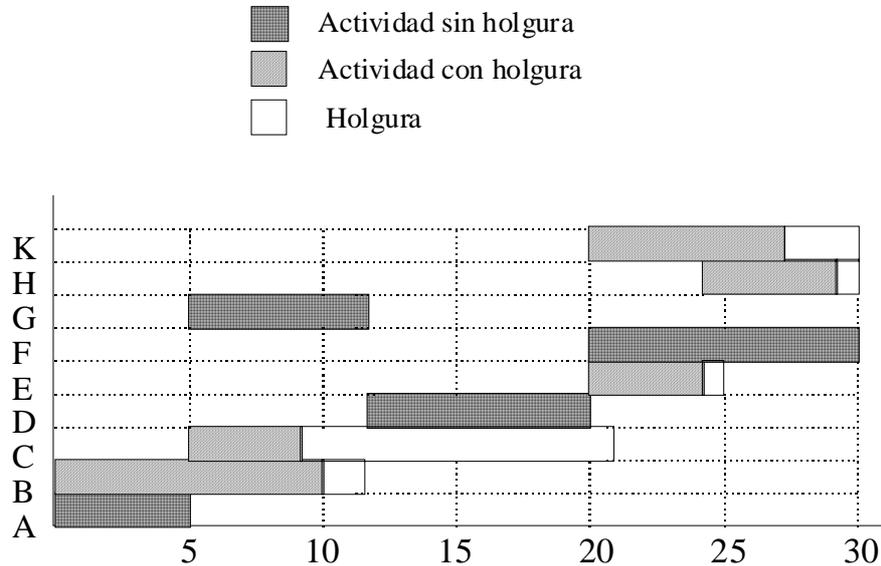
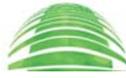


Figura 25. Diagrama de Gantt correspondiente al ejemplo de Tabla 6

La Figura 25 determina cómo las actividades A, D, F y G, que conforman el camino crítico carecen de holgura viniendo su fecha de comienzo y finalización definida de forma unívoca. En cambio el resto de tareas podrá retrasar su comienzo en función de sus holguras sin provocar ningún tipo de demora en la realización del proyecto.



2.10. Control de costes

El control de costes es una herramienta vital para el equipo de gestión del proyecto ya que los informes pueden indicar tendencias de coste del proyecto lo suficientemente previas para ver las posibles desviaciones y aplicar planes de contingencia establecidos para estos casos.

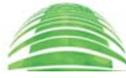
El presupuesto del proyecto, que es el resultado final del ciclo de planificación, debe ser razonable, alcanzable, basado en el coste contractual alcanzado y de acuerdo con la EDP. Todo presupuesto debe ser detectable a través de un presupuesto de funcionamiento base, que incluye:

- Margen de gestión
- Presupuesto distribuido
- Presupuesto sin distribuir
- Cambios en el contrato

Una variación se define como cualquier desviación de un plan específico. La variación del sistema del presupuesto y programa deben ser comparadas de forma conjunta ya que la variación del coste no proporciona una medida de comparación entre el trabajo programado y el realizado y la variación del programa no incluye los costes.

Para el cálculo de las variaciones debemos definir tres conceptos básicos:

- **Coste presupuestado del trabajo programado (CPTP):** Es la cantidad presupuestada de coste para que el trabajo programado sea logrado según el nivel de esfuerzo estimado.
- **Coste presupuestado del trabajo realizado (CPTR):** Es la cantidad de coste que se ha presupuestado para el trabajo terminado.
- **Coste real del trabajo realizado (CRTR):** Es la cantidad divulgada realmente que se necesita para terminar el trabajo dentro de un periodo dado



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

Usando estas definiciones obtenemos las siguientes expresiones de variación:

- **Variación de coste (CV):** $CPTR - CRTR$
- **% Variación de costes (CVP):** $CV/CPTR$
- **Variación de plazo (SV):** $CPTR - CPTP$
- **% Variación de plazo (SVP):** $SV/CPTP$

Un índice de variación $CV < 0$ indicará que el proyecto incurre en sobrecostes, mientras que una variación negativa del SV indica una sobreasignación de recursos al plazo.

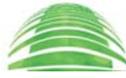
Además de poder calcular las variaciones de coste, también deberíamos saber el nivel de eficiencia del trabajo que se ha completado. Para calcularlo se utiliza un porcentaje del CPTR mediante dos formulas:

- Índice de rendimiento de los costes realizados (CPI) = $CRTR / CPTR$
- Índice de rendimiento del programa (SPI) = $CPTR / CPTP$

El análisis para ambos índices es el mismo. Si es igual a 1 el trabajo se ha realizado de acuerdo con lo previsto, si es inferior a 1 la realización del trabajo no ha sido eficiente y si es superior a 1 tenemos una realización por encima de los niveles esperados. Así mismo podemos definir la productividad como $P = CPI * SPI$ los rangos para esta variable son los siguientes:

- Rango 0.9-1.2 bien
- Rango 0.8-0.9 o 1.2-1.3 revisar
- Rango menor de 0.8 o mayor de 1.3 problemas

Para completar nuestro análisis del estado de un proyecto debemos determinar el Coste presupuestado del proyecto (BAC) y el coste estimado del proyecto (EAC). El presupuesto de ejecución es la suma de todos los



2. Gestión de proyectos en Ingeniería.

presupuestos CPTP asignados al proyecto. La estimación para la ejecución del proyecto identifica las unidades monetarias u horas que representan una valoración realista del trabajo cuando esta realizado.

Utilizando estas dos definiciones podemos calcular la variación de la ejecución (VAC) como la diferencia entre BAC y EAC