

## CAPITULO II

### PROGRAMACIÓN

#### 2.1 Generalidades

Un proyecto define una combinación de actividades interrelacionadas que deben ejecutarse en un cierto orden antes que el trabajo completo pueda terminarse. Las actividades están interrelacionadas en una secuencia lógica en el sentido que algunas de ellas no pueden comenzar hasta que otras se hayan terminado. Una actividad en un proyecto, usualmente se ve como un trabajo que requiere tiempo y recursos para su terminación. En general, un proyecto es esfuerzo de un solo periodo; esto es, la misma sucesión de actividades puede no repetirse en el futuro.

En el pasado, la programación de un proyecto (en el tiempo) se hizo con poca e incluso sin planeación. La mejor herramienta conocida de "Programación" en ese entonces era el diagrama de barras de Gantt, el cual especifica los tiempos de inicio y terminación de cada actividad en una celda de tiempo horizontal. Su desventaja es que la interdependencia entre las diferentes actividades (la cual controla principalmente el progreso del proyecto) no puede determinarse a partir del diagrama de barras. Las complejidades crecientes de los proyectos actuales han demandado técnicas de planeación más sistemáticas y más efectivas con el objeto de optimizar la eficiencia en la ejecución del proyecto. La eficiencia aquí implica efectuar la mayor reducción en el tiempo requerido para terminar el proyecto mientras se toma en cuenta la factibilidad económica de la utilización de los recursos disponibles.

La administración de proyectos ha evolucionado como un nuevo campo con el desarrollo de dos técnicas analíticas para la programación y control de proyectos. Tales son el Método de Ruta Crítica (CPM) y la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (PERT). Las dos técnicas fueron desarrolladas por dos grupos diferentes casi simultáneamente (1956-1958). El CPM fue desarrollado por E.I. du Pont de Nemours & Company como una aplicación a los

proyectos de construcción y posteriormente se extendió a un estado más avanzado por Mauchly Associates. (Fuente: Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman; Introducción a la Investigación de Operaciones, Quinta edición, Editorial. McGraw Hill, México 1993.) El PERT, por otra parte, fue desarrollado por la Marina de Estados Unidos por una organización consultora con el fin de programar las actividades de investigación y desarrollo para el programa de misiles Polaris.

Los métodos PERT y CPM están básicamente orientados en el tiempo en el sentido que ambos llevan a la determinación de un programa de tiempo. Aunque los dos métodos fueron desarrollados casi independientemente, ambos son asombrosamente similares. Quizá la diferencia más importante es que originalmente las estimaciones en el tiempo para las actividades se supusieron determinantes en CPM y probables en PERT. Ahora PERT y CPM comprenden realmente una técnica y las diferencias, si existe alguna, son únicamente históricas. En adelante, ambas se denominarán técnicas de "programación de proyectos".

La programación de proyectos por PERT-CPM consiste en dos fases básicas: Programación y Control.

La fase de programación se inicia dividiendo el proyecto en actividades. Las estimaciones de tiempo para estas actividades se determinan luego y se construye un diagrama de red (o de flechas) donde cada uno de sus arcos (flechas) representa una actividad. El diagrama de flechas completo da una representación gráfica de las interdependencias entre las actividades del proyecto. La construcción del diagrama de flechas como una fase de programación, tiene la ventaja de estudiar los diferentes trabajos en detalle, sugiriendo quizá mejoras antes del que el proyecto realmente se ejecute. Será más importante su uso en el desarrollo de un programa para el proyecto.

El objetivo de la fase de programación es construir un diagrama de tiempo que muestre los tiempos de iniciación y terminación para cada actividad, así como su relación con otras

actividades del proyecto. Además, el programa debe señalar las actividades críticas (en función del tiempo) que requieren atención especial si el proyecto se debe terminar oportunamente. Para las actividades no críticas el programa debe mostrar los tiempos de holgura que pueden utilizarse cuando tales actividades se demoran o cuando se deben usar eficientemente recursos limitados.

La fase final en la administración de proyectos es la de control. Esto incluye el uso del diagrama de flechas y la gráfica de tiempo para hacer reportes periódicos del progreso. La red puede, por consiguiente, actualizarse y analizarse y si es necesario, determinar un nuevo programa para la porción restante del proyecto.

La programación no es el final del objetivo, sino una gran ayuda para la terminación del proyecto y es la determinación de tiempos para las operaciones que abarcan el proyecto; la suma de los tiempos constituye el tiempo total de terminación. La programación puede realizarse solo después de haber definido el plan particular para el proyecto, y de que éste se haya modelado de forma que pueda expresarse en la forma de un diagrama de red.

Por lo tanto se puede definir como un diagrama o lista del trabajo por hacer, con sus tiempos asociados”

La programación es además el proceso de seleccionar el método y el orden de trabajo a adoptar para el proyecto entre todos los caminos y secuencias por los que pudiera realizarse. La secuencia de las etapas requeridas para lograr el resultado óptimo es el plan adecuado de los trabajos. La programación es un término general que es usado para unir las ideas referidas comúnmente a la calendarización y organización. Su meta puede ser definida como:

Asegurarse de que todo el trabajo requerido para completar el proyecto quede terminado:

- En el orden correcto

- En el lugar adecuado
- En el tiempo correcto
- Por la gente y equipo adecuados
- Con la calidad esperada
- De la manera más económica, segura y protegiendo al ambiente

## 2.2 Análisis del Proyecto

El primer paso consiste en descomponer el proyecto en las operaciones individuales o procesos necesarios para su terminación; esto dependerá de cada proyecto, de la naturaleza del trabajo y la clase de mano de obra con la que se cuente, detalle de facturas y la secuencia global general del trabajo. Cada una de estas operaciones o procesos separados se denomina actividad y la terminación de una actividad constituye un evento que señala el logro exitoso de la tarea. Las actividades por lo tanto consumen tiempo, mientras que los eventos no; los eventos están separados entre sí por actividades.

Cualquiera que sea la definición básica, diferentes tipos de actividades pueden ser identificadas de distintas maneras:

- **Actividad Normal:** es aquella que opera sobre un tiempo determinado usando recursos en particular y para la cual es posible definir su relación con otras actividades claramente.
- **Actividad de resumen:** es una actividad, que une dos eventos específicos, que puede ser el dividir dos o más actividades normales. Su duración al inicio no es especificada y es solamente determinada por la diferencia entre los tiempos de los eventos en cuestión.
- **Actividades de proceso:** esta es similar a una actividad normal, excepto que no es posible el definir su relación completamente con otras actividades usando solo sus

tiempos de inicio y fin. En la realidad, las actividades de proceso son actividades normales que están geográficamente esparcidas (por ejemplo trabajos de superficie en pavimentos). Muchos encargados de planeación no reconocen la diferencia entre estas actividades y las normales, y usan técnicas desarrolladas para actividades normales con actividades de proceso. Esto puede causar un mal entendido.

- **Actividades de proceso químico:** Estas también son similares a las actividades normales, excepto que es imposible el detenerlas una vez que ya han comenzado. A menudo no requieren recursos estándar y trabajan 24 horas, 7 días a la semana y durante todo el año. Como ejemplo podemos citar el “curado de concreto”.

Cuando se tiene la lista de todas las actividades de un proyecto, el paso siguiente consiste en determinar la relación esencial entre dichas actividades. En muchos casos las actividades pueden tener lugar en forma concurrente, pero están restringidas según una secuencia determinada o “cadena”.

### **2.3 Programación del diseño**

Sin una programación adecuada, una empresa encontrará que su operación es tan ineficiente como si no hubiera procedimientos estándar. Para realizar el diseño, es esencial que la compañía programe las necesidades de mano de obra. Esta tarea se vuelve más importante conforme crece la cantidad de proyectos que van a ser realizados al mismo tiempo. Una administración adecuada de la empresa será capaz de programar su trabajo de manera que no acepte más del que pueda realizar adecuadamente con una cantidad establecida de personal.

Para la planificación de la carga de trabajo total, es esencial la programación del proyecto individual. El método más simple y común utilizado para este propósito es el diagrama de barras,

el cual es una representación gráfica de las capacidades de mano de obra (representada por barras) con respecto al tiempo. Al estudiar este diagrama, se determinan rápidamente las fechas de inicio y terminación del trabajo y cuando y en que cantidad serán mayores las necesidades de mano de obra.

Los procedimientos de programación, como el método de la ruta crítica (critical-path method, CPM) y la técnica de evaluación y revisión del programa (program evaluation and review technique PERT), tienen un lugar definido en la planeación de los recursos de mano de obra para elaborar un diseño. Aunque no es usual el diseño de proyectos en los cuales se emplean totalmente las técnicas CPM o PERT, en muchos casos está justificada la modificación o el uso limitado de estas técnicas de programación. Un programa de computadora completo del CPM, que incluya los costos en la programación, así como el tiempo y la evaluación de los programas económicos “críticos”, solo sería usado en los proyectos más complejos. Debido a que requieren una planeación más a fondo, el empleo de los diagramas CPM y PERT en las actividades básicas con frecuencia da mejores resultados en la programación del proyecto que si sólo se utilizara el diagrama de barras. Con el uso de un diagrama de barras, el inicio o la terminación de las actividades representadas por una barra puede extenderse una semana o más sin que se afecte la planeación básica. Los diagramas CPM o PERT no permiten esto, ya que la diagramación de las actividades las interrelaciona a todas y, por tanto, los cambios en el tiempo de una actividad las afectan a todas.

## **2.4 Programación de un proyecto**

La programación de un proyecto es moldeada por los planes estratégicos de una organización, que, a su vez, son influenciadas por las demandas de mercado y las restricciones de recursos. El proceso de programación asociado con los estudios de planeación y factibilidad proporciona las

prioridades y el tiempo de iniciación de diversos proyectos para alcanzar los objetivos finales de las organizaciones.

Para ganar tiempo, algunos propietarios soslayan los estudios de planeación y factibilidad y se lanzan directamente a la construcción, con una definición inadecuada del alcance del proyecto. Invariablemente, los subsecuentes cambios en el alcance incrementarán los costos de construcción.

La iniciación y ejecución de proyectos establece demandas en los recursos del propietario, así como en los de profesionistas y contratistas al servicio del propietario. Para proyectos muy grandes, el mismo tamaño puede incrementar el costo de los servicios de ingeniería, tanto como los costos de materiales y equipo, así como los costos de los contratos.

Consecuentemente, este factor deberá tomarse en consideración para determinar la calendarización del proyecto

#### **2.4.1 Programa de avance de un trabajo**

Este programa debe mostrar todos los renglones que afectan el avance del trabajo y considera la duración de la temporada de construcción en el lugar en particular. Cuando este sea el caso, el programa debe tomar nota de la fecha más ventajosa o de la fecha requerida para los trabajos de las primeras etapas, como es la desviación de las aguas de un río para una presa; cuando se pueda obtener la entrega de equipo nuevo e especializado de construcción de planta; posibles fechas de entrega para partidas de importancia crítica de materiales permanentes proporcionados por el contratista; fechas de entrega de partes importantes de equipo permanente que vayan a ser entregados por el propietario; y otros factores esenciales. Con base en las fechas precedentes, deben determinarse los ritmos de producción para los elementos importantes de trabajo. Del

mismo modo, también debe determinarse el tipo, número y tamaño de varias unidades de equipo de construcción de planta y equipo necesario para completar el trabajo, según lo indique el programa. Los programas de trabajo deben elaborasen en varias formas.

Con base en el programa de avance, debe anotarse una breve descripción del trabajo. La descripción debe llamar la atención de características indefinidas, riesgosas, o inciertas, así como de elementos que sean probables aumenten o disminuyan en cantidad. También, la descripción debe incluir una relación del total de hombres-hora de mano de obra y del total de máquinas-hora para equipo importante que se estimen necesarios para hacer el trabajo. Además, la descripción debe comprender necesidades máximas de obreros y para controlar entregas de elementos importantes de materiales y equipo. Por último, la descripción debe contener una relación de necesidades de recursos financieros derivadas de ingresos y egresos programados.

#### **2.4.2 Programación para ahorrar dinero**

Para el contratista, la reducción del tiempo en terminar el trabajo significa, de igual manera, reducir los cargos de interés sobre el efectivo invertido durante la construcción. Asimismo, cuando mas corto sea el tiempo para terminar el trabajo, menores serán los gastos de supervisión, administración y generales. Además los beneficios se acumulan si se acorta el tiempo, debido a que permiten arrendar el equipo para emplearlo en otro trabajo.

El programa de construcción consiste en ordenar las diversas, operaciones, comprendidas en la construcción de un proyecto, en la secuencia requerida para lograr su terminación en el mínimo periodo que se económicamente viable. Para asegurar la terminación del trabajo dentro del tiempo límite estipulado por el contrato, y para reducir el tiempo requerido para realizarlo, es necesario programar cada unidad del proyecto y relacionarla con las demás.



## 2.5 Programación mediante una gráfica de barras rectangulares (Diagrama de Gantt)

Los programas de trabajo muestran las fechas de inicio y terminación de los diversos elementos de un proyecto. Para la obra contratada a precio unitario, se emplea en general el detallado de la propuesta. Los contratos a suma global o precio alzado tienen la subdivisión de acuerdo en el estimado de costos. Los programas pueden prepararse en forma tabular o gráfica, aunque esta última se emplea más debido a su visualización.

La representación gráfica más utilizada es la gráfica de barras rectangulares. Esta gráfica muestra las fechas de inicio y de terminación de cada partida de trabajo. Indica también las partidas en las cuales se empalma el trabajo, las partidas que traslapan a otras y por qué cantidad, y las partidas que deben quedar terminadas antes de que se comiencen otras.

Esencialmente, una barra en una gráfica de barra, significa que la actividad se desarrolla en un periodo de tiempo indicado por las esquinas de la barra. El argumento siguiente se debe de contemplar en la producción o en la interpretación subsiguiente de la gráfica de barra:

- El rango de progreso es constante a lo largo de la longitud de la barra
- Los recursos son constantes a lo largo de la longitud de la barra
- Los tiempos de inicio mostrados, son los tiempos en los cuales las actividades deben comenzar y no en los que pueden.

Debido a las posibles complicaciones o mal interpretaciones, las gráficas de barras son particularmente apropiadas para proyectos simples o para plasmar proyectos complejos en forma general. Las gráficas de barra son herramientas excelentes como un medio de comunicación importante para la información de la planeación; siendo su uso, usado más que un simple programa de actividades.

La razón por la cual las gráficas de barra pueden comunicar efectivamente, se debe a su simplicidad y a su adaptabilidad.

Las gráficas de barra son además versátiles en la manera en que pueden mostrar el trabajo usado en un recurso sencillo, una cuadrilla sencilla, un subcontratista en particular o un área específica de un proyecto. Para esta aplicación, las gráficas pueden ser dibujadas mostrando solo la información relevante.

Una barra en una gráfica de barra se puede identificar por su nombre, usualmente el nombre de la actividad. Para algunos tipos de trabajo (por ejemplo en carreteras). Una gráfica eficiente puede lograrse solo si las actividades considerablemente grandes puedan separarse o si actividades pequeñas son combinadas con actividades mayores.

En proyectos lineales en general, como proyectos de colocación de tubería o bien en proyectos carreteros, donde la distancia es un parámetro particular de mucha importancia, una alternativa para una gráfica de barra es la colocar el tiempo en contra de la distancia, en vez de colocar el tiempo en contra del nombre de la actividad (se mostrará adelante).

Los programas de trabajo deben elaborarse al comienzo del trabajo, con la finalidad de coordinar el trabajo de todos los departamentos de la organización del contratista.

Los contratos de construcción requieren con frecuencia que el contratista proporcione un programa de trabajo para que sea autorizado por el propietario dentro de un tiempo especificado, después que le ha sido concedido el contrato y antes que se inicie la construcción. A menudo se subraya la importancia de este requisito en las disposiciones del contrato, de manera que la

omisión o negligencia en presentar un programa satisfactorio puede anular la concesión del contrato y perderse la garantía de la propuesta.

Con el fin de comparar la realización del trabajo con respecto al programado, se dibuja otra barra debajo de las del programa que muestre las fechas de comienzo y terminación reales. Este método tiene la ventaja de la sencillez, pero no indica el ritmo de avance requerido por el programa o que la ejecución real está adelantada o retrasada con respecto al mismo y usualmente es difícil ver inmediatamente los efectos de los cambios al proyecto (por ejemplo, variaciones o cambio de órdenes) debido a que la información usada para derivar el plan no se muestra en la gráfica de barra.

### **2.5.1 Gráfica de barras ligadas**

En este tipo de gráficas de barra ligadas (figura 2.1), las flechas son usadas para proveer las ligas mostrando alguna (usualmente la importante) interdependencias de las actividades. Esto aparentemente parece sencillo y de mucha ayuda puede producir pronto confusiones.

A manera que el tamaño y la complejidad de los proyectos se incrementa, se volverá difícil el evadir la intersección de líneas, sobre posición de las mismas, que se crucen las barras o perder el control en una multitud de líneas.

Las flechas muestran algunas veces la lógica de la construcción pero son usadas comúnmente la conexión de recursos para mostrar el progreso propuesto de los recursos clave a lo largo del proyecto. Esto está bien hasta que algo cambia, y en la construcción esto es casi una seguridad, entonces, estas ligas tienen serios problemas. Sin ninguna explicación de que significan, la lógica usada por las flechas en una gráfica de barra ligada puede ser mal interpretada.

En la práctica, el uso de las flechas representa ligas en una gráfica de barra, deberá verse como un acto para balancear la información extra de planeación y la pérdida de claridad en el uso de las gráficas de barra como medio de comunicación.

En la realidad, las gráficas de barra ligadas son mejores de usar en proyectos simples o para proyectos lineales.

Numero	Actividad	Fecha de trabajo terminado por semana												
		10-Jun	17-Jun	24-Jun	01-Jul	08-Jul	15-Jul	22-Jul	29-Jul	06-Ago	13-Ago	20-Ago	27-Ago	03-Sep
1	Cimentaciones este		■											
2	Cimentaciones oeste				■									
3	Cimentaciones centro	■												
4	Cimbrado subestructura este			■		■								
5	Cimbrado subestructura oeste							■	■		■			
6	Cimbrado subestructura centro				■		■							
7	Descimbrar subestructura este							■						
8	Descimbrar subestructura oeste											■		
9	Descimbrar subestructura centro								■	■				
10	Cimbrado muros este					■		■	■					
11	Descimbrado muros este									■	■			
12	Cimbrado muros oeste								■	■	■			
13	Descimbrado muros oeste											■	■	
14	Cubierta in situ							■	■	■	■	■	■	
15	Descimbrado cubierta in situ													■

**Figura 2.1** Programa de avance de la grafica de barras. El comienzo y final de una línea horizontal indican, respectivamente, el comienzo y final de una actividad.

### 2.5.2 Gráfica de barras triangulares

En este tipo de gráfica se introduce el concepto de ritmo de avance; aquí las distancias horizontales representan el tiempo permisible para realizar el trabajo y las verticales representan el porcentaje del cumplimiento. Así que las pendientes de estas líneas indican el avance (figura 2.2).

El efecto del tiempo ganado o perdido en cualquier actividad se refleja en muchos otros detalles de trabajo. Por tanto, es necesaria una frecuente revisión, para que los programas de trabajo en todas las actividades conserven su precisión. Sin embargo la revisión formal de todo el programa de trabajo con frecuencia se considera innecesaria, debido a que la dependencia del

contratista con respecto al programa es sustituida por su familiaridad con las operaciones principales y con los factores físicos, de tal manera que todo el personal sabe que debe hacer y cuándo.

Con frecuencia las actividades críticas están sujetas a un análisis y a programación detallados, Esto puede tomar la forma de esquemas tridimensionales, de vistas amplificadas, de dibujos de las etapas de la construcción y dispositivos y ayudas similares para la visualización. Después, una programación mayor de actividades como el vaciado del concreto, el desmonte o los programas de colocación de la tubería, pueden proyectarse y emplearse conforme se requiera.

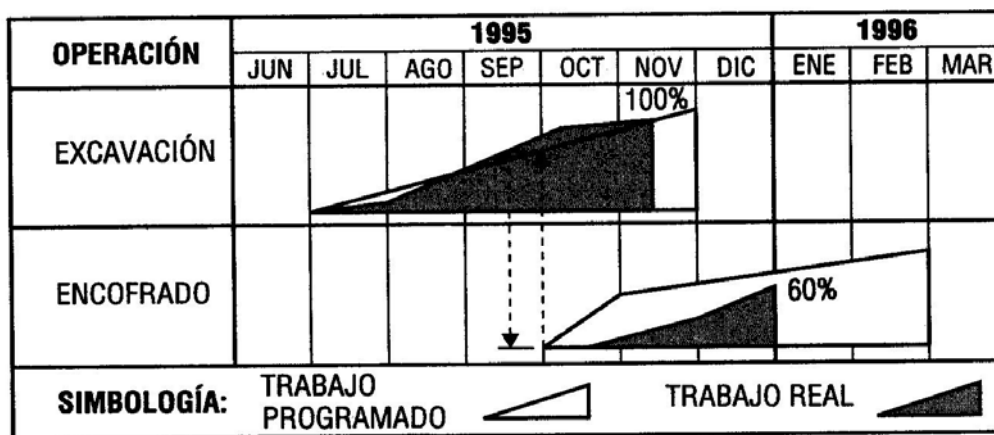


Figura 2.2 Programa de avance de barras triangulares.

### 2.6 Método de programación de la ruta crítica (CPM)

Este método se desarrolló como herramienta para administrar situaciones especiales. En algunos contratos varias dependencias gubernamentales obligan su uso. El CPM se basa en la planeación del trabajo que va más allá de lo que es necesario para hacer una licitación. Además de la división paso por paso del trabajo en sus operaciones componentes y de la graficación de sus relaciones secuenciales, los planificadores deben saber cuánto tiempo llevará cada operación, el

tiempo de espera requerido en la obtención de los materiales y el equipo, que tanto llevará al prepara los planos de taller y obtener su aprobación . Los planificadores deben conocer las pruebas especiales requeridas y el tiempo necesario para hacerlas.

Ahora bien, una ruta crítica es aquella ruta cuyas actividades se consideran críticas, es decir que su holgura es cero, estas actividades están conectadas a lo largo de la ruta de principio a fin y un atraso de tiempo en cualquiera de estas provocará un atraso en el tiempo total del proyecto.

Después de dividir el proyecto en sus actividades, éstas se ponen en lista y se grafican de manera que se muestren todas las relaciones secuenciales. Las actividades se representan por flechas o por círculos, o nodos, unidos por una secuencia de líneas. El análisis para establecer un programa realista se hace por métodos manuales o computarizados, resaltando las operaciones cuyas fechas de terminación establecen la duración total del proyecto, planteando las modificaciones al trabajo para determinar cuales son las operaciones afectadas y el efecto que tienen en la duración del proyecto, establecer una secuencia adecuada de las operaciones de trabajo y determinar el estado del avance del trabajo en relación con la cantidad de días de adelanto o retraso con respecto al programa.

### **2.6.1 Ventajas del método de la ruta crítica**

Se puede orientar los problemas de un proyecto en forma individual y puede ser tan detallado como se desee para adaptarse a las situaciones y riesgos previsibles. Nos permite la revisión del proyecto durante su ejecución de forma sistemática las situaciones a medida que se presentan, de forma que pueden conocerse tolerancias en cuanto los efectos de incertidumbre de la planeación y permite llevar a cabo una reevaluación de incertidumbres futuras y las medidas iniciales como

remedios para dichas operaciones y solo para tales operaciones que requieran corrección o aceleración.

Su uso en Estados Unidos ha llevado a disminuir hasta el 20% en tiempo de los proyectos, esto con respecto a otros proyectos análogos que no emplearon el método de la ruta crítica. Esto es posible porque el diagrama de red muestra con claridad los procesos cuyo tiempo de terminación son responsables de la terminación de la duración del proyecto; estas operaciones críticas deben mantenerse puntuales. Estas operaciones críticas hacen un camino de operaciones a lo largo de la red, esta es la ruta crítica a lo largo del proyecto. Todas las demás operaciones tienen alguna tolerancia.

La ruta crítica permite la planeación más económica de las operaciones para cumplir con las fechas que se desean. Sustituyen el juicio basado en la experiencia antes utilizado para seleccionar los tiempos de operación, el tamaño de las cuadrillas, los equipos, etc. Por último nos da un medio para evaluar el efecto de las variaciones, como son las órdenes de trabajo, los trabajos extras o las deducciones, sobre el tiempo de terminación y el costo de los trabajos.

### **2.6.2 Datos básicos para el método de la ruta crítica**

Es necesario contar con una estimación precisa del tiempo y el costo de cada una de las operaciones que comprende el proyecto. Esto significa que las estimaciones comunes de costo directo, basadas en el estudio pormenorizado de las cantidades, se preparan de la forma habitual. Las operaciones que componen al proyecto pueden ser los elementos reales de trabajo que aparecen en la cuenta, o bien, estos mismos pueden combinarse o dividirse en más operaciones y procesos más adecuados a los trabajos que se tiene en cuenta. Así el proyecto se descompone en operaciones individuales y esta descomposición puede ser tan simple o detallada como se desee.

Después de numerar y completar los costos normales y los datos de tiempo para cada operación no es difícil enumerar los costos bajo consideraciones distintas de lo normal. De esta manera los datos de costo y de tiempo se preparan teniendo en cuenta variaciones como más horas de trabajo, el cambio de turnos, el tamaño de las cuadrillas de los trabajadores, el uso de equipos opcionales, los cambios en los métodos de construcción o cualquier otra variación en el proyecto.

Para los proyectos que requieren un vasto número de operaciones y opciones que puedan considerarse para llegar a la mejor solución los cálculos se pueden llevar mediante computadoras. En la mayoría de los proyectos de construcción los cálculos personales serán suficientes, estos tienen la ventaja de que quien planifica obtiene un mayor conocimiento del proyecto y sus problemas. Ya sea que el trabajo se lleve a cabo por computadora, o métodos manuales, en ambos casos se requieren los mismos datos de entrada y se obtiene la misma información de salida.

## **2.7 Diagrama de red**

Una red es un diagrama de un programa o plan correspondiente a un proyecto o parte de un proyecto, que muestra la secuencia correcta y la relación entre las actividades y eventos que requieren para lograr los objetivos finales.

En la red orientada a las actividades o diagramas de flecha cada línea o flecha representa una actividad, y la relación entre las actividades se representa mediante la relación de una flecha con las demás, cada círculo o nodo representa un evento.

En la figura 2.3 encontramos este tipo de diagramas. En este el largo de la flecha no tiene ningún significado solo representa el paso del tiempo en dirección de la flecha. Cada actividad



individual se representa mediante una flecha y el inicio de todas las actividades que parten de un nodo depende de la terminación de todas las actividades que llegan a dicho nodo. Por lo tanto el evento que representa cualquier nodo no se logra hasta que todas las actividades que llegan a este hayan terminado. A esto se le denomina tiempo del evento.

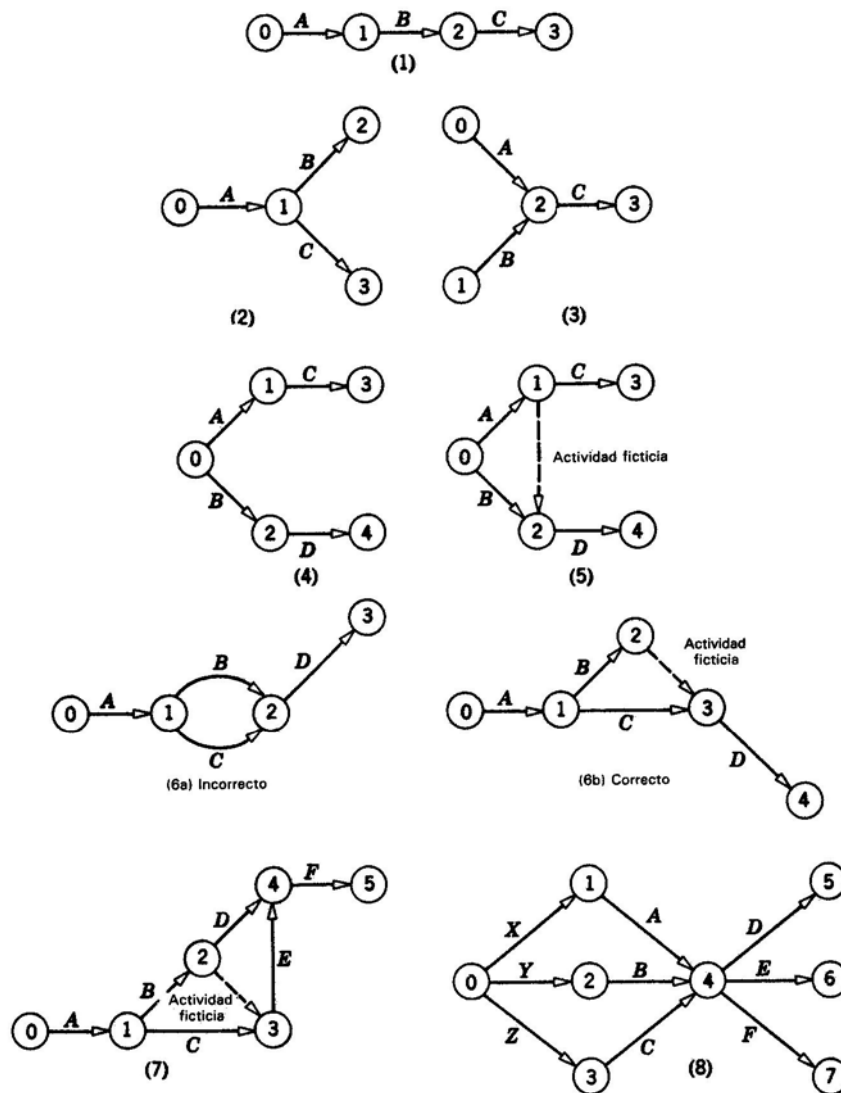


Figura 2.3 Elementos de un diagrama de flechas

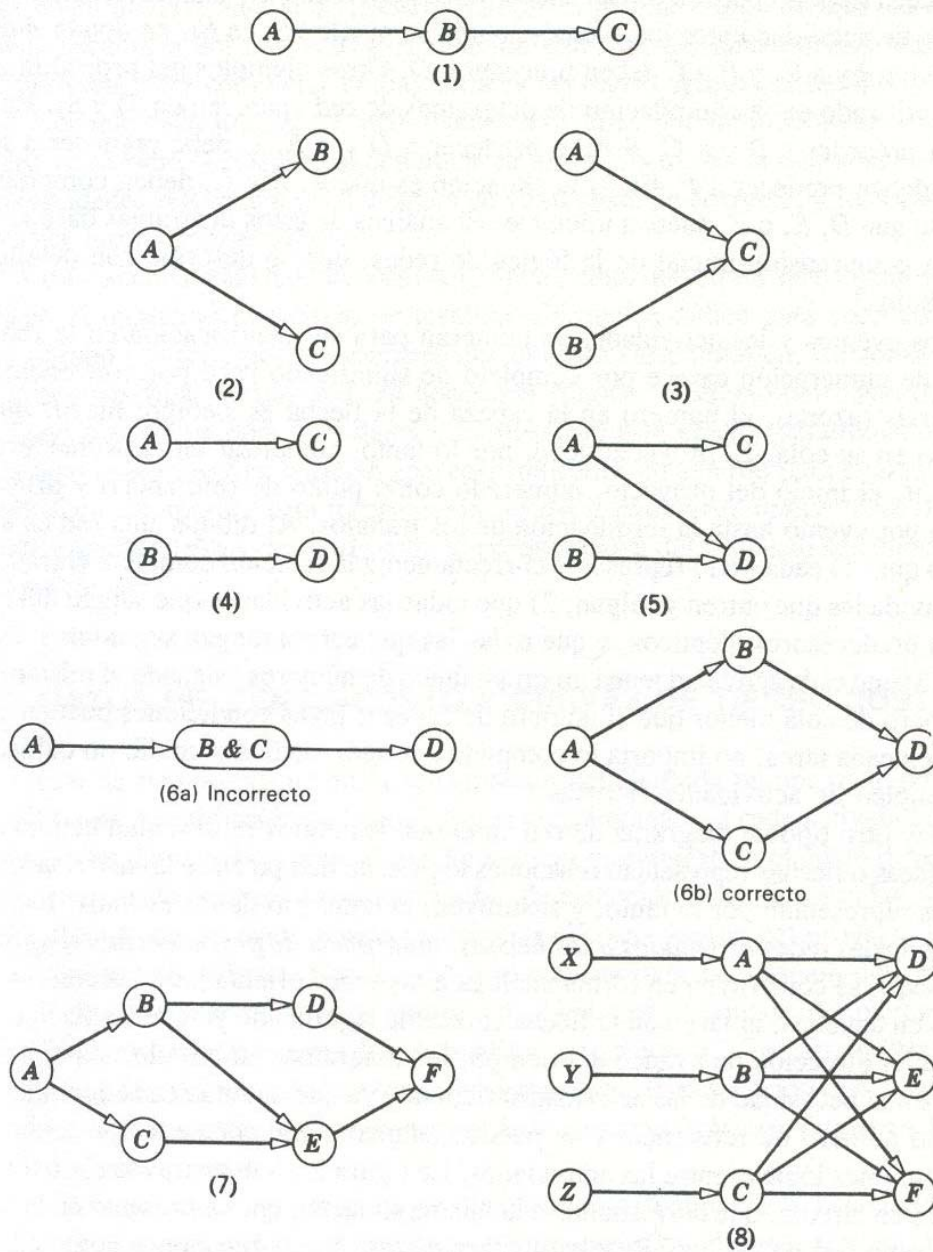
Los diagramas de red de la figura 2.4 ilustran algunos de los procedimientos lógicos adoptados por los métodos de la ruta crítica. En 1) A debe preceder a B y B preceder a C. en 2) A debe preceder tanto a B como a C. en 3) A y B deben preceder a C en 4) A debe preceder a C

y B debe preceder a D. en 5) A debe preceder a C y D, y B debe preceder a D; esto requiere flechas de conexión, llamada de actividad ficticia o de liga para mantener la secuencia lógica de hechos. Las actividades ficticias que no tienen costo no requieren tiempo de ejecución se representan por flechas punteadas, pueden requerirse también para mantener una identificación específica entre los eventos, como puede verse en 6) en donde A debe preceder a D y a C, B y C deben preceder a D. Otros ejemplos del procedimiento lógico utilizado en la compilación de la red de diagramas aparecen en 7) y 8).

Los eventos y las actividades se numeran para su identificación en la red. No existe orden de numeración pero por convención el número en la cabeza de la flecha es siempre mayor que el número en su cola. Por lo que el proyecto debe comenzar en el primer evento y procede evento por evento hasta la terminación de los trabajos. Al dibujar una red es regla que:

- Cada nodo represente de manera correcta la relación completa entre todas las actividades que entren y salgan
- Las actividades que salgan del nodo tengan predecesores idénticos, y que todas las actividades que entren tengan seguidores idénticos
- Cada actividad tenga un grupo único de números asignado al mismo, con el número de cola menor que el número de cabeza.

Hay otro tipo de diagrama de red en el que los nodos representan actividades y las líneas o flechas representan relaciones de tiempo entre las actividades; las flechas representan por lo tanto a los eventos. Estas redes llamadas redes orientadas a los hechos, diagramas de precedencia y diagramas en círculo se construyen de forma similar a las redes orientadas a las actividades.



**Figura 2.4** Elementos de un diagrama en círculos

Los métodos de la ruta crítica se ocupan no solo de la secuencia de interrelación de actividades, sino también del tiempo y del costo de terminación de las actividades. Por definición, un diagrama de red es la representación esquemática de un proyecto, en la que aparecen las actividades relevantes y los eventos colocados en posición correcta, y los tiempos requeridos para su terminación.

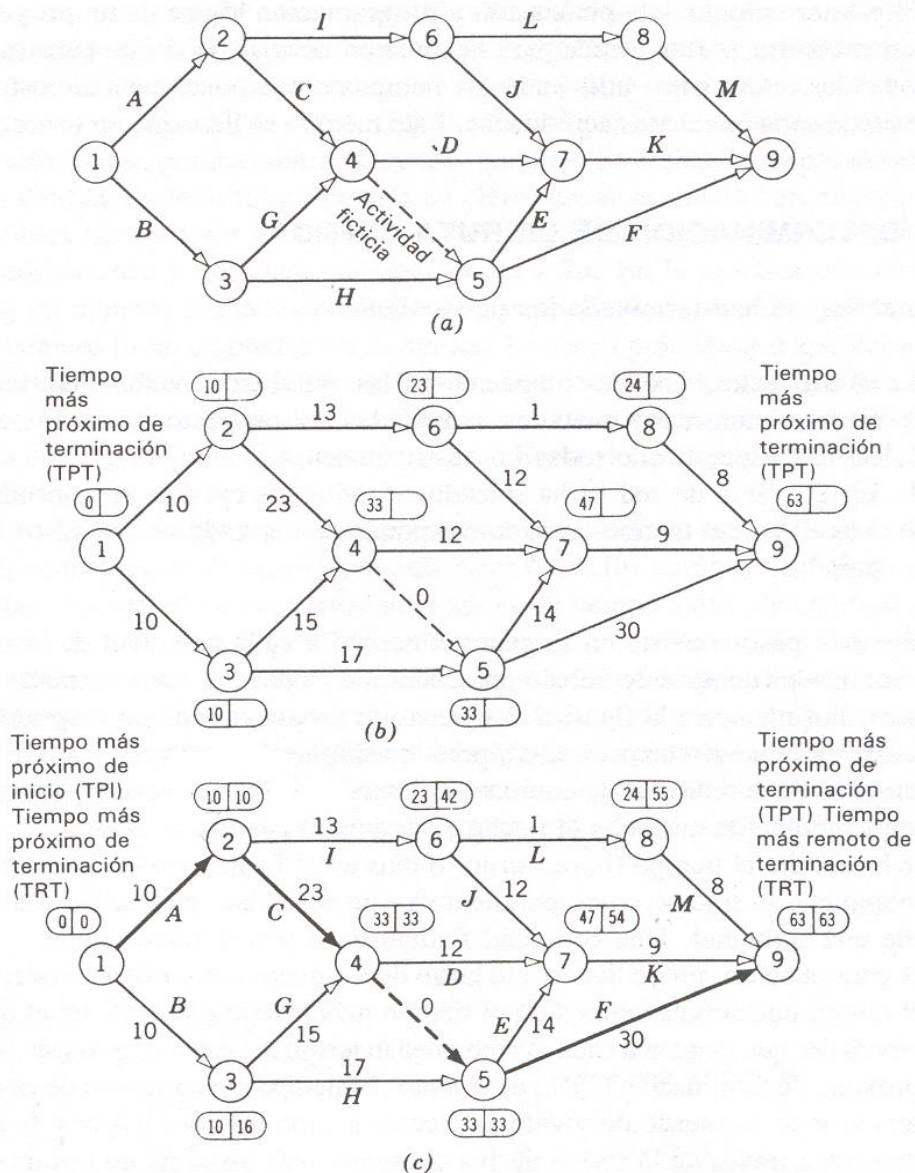
Para cada actividad hay un costo correspondiente, que en forma habitual se aplica sólo en el momento de terminación que se indica para cada actividad. Si el tiempo varia, es probable que el costo también varíe, por lo que en el análisis final de una red, es necesario conocer el efecto del costo debido a un cambio en el tiempo.

## 2.8 Determinación de la ruta crítica

Ya que el proyecto se ha descompuesto en actividades viables únicas, enumerado las actividades, y trazado el diagrama de red, el paso siguiente es asignar un tiempo a cada actividad de la red; para ello se utiliza los tiempos de trabajo procedentes de todos los datos normales de tiempo costo. En la figura 2.5 se muestra un diagrama de flechas que corresponde a un ejemplo simple de 13 actividades. El primer trazo se vería como en *a*. La asignación de los tiempos correspondientes a la solución normal a la flecha aparece en *b*. Junto a cada flecha se escribe el tiempo (ya sea hora, turno, días) necesario para completar el trabajo correspondiente a esta actividad; esto se nombra duración de una actividad. Una actividad ficticia tiene una duración nula.

Después, procediendo a lo largo de los eventos en orden numérico a partir del inicio, una suma dará el tiempo más próximo posible en el que las actividades que lleguen a cada evento puedan terminar; este es, entonces, el tiempo más próximo de terminación (TPT) del evento. El tiempo más próximo de cada evento se anota al lado izquierdo del óvalo adyacente. Después de proceder a la derecha a través de la red se deriva el tiempo más próximo de terminación del último evento; este es el tiempo más próximo posible de terminación del proyecto y es la suma de las duraciones de la ruta más larga posible a través de la red desde el inicio hasta la terminación. En *b* es de 63 días. Si este periodo se acepta como duración del proyecto que no debe alargarse, el paso siguiente consiste en retroceder desde el evento final, restando la duración de cada actividad, para encontrar el tiempo más remoto de terminación (TRT). Este tiempo es

permisible para cada evento si el proyecto debe terminarse al tiempo más próximo de terminación del evento final. El tiempo de terminación más remoto esta controlado por todas las actividades, a partir del evento en cuestión, y es la cifra mínima así obtenida. Si el evento no se logra antes de su tiempo más remoto de terminación el proyecto se retrasara. El valor del tiempo más remoto de terminación se coloca al lado derecho del óvalo adyacente a cada evento, como se indica en 2.5c.



**Figura 2.5** Pasos en la determinación de la ruta crítica para una red. a) Primer bosquejo del diagrama de red. b) Determinación de los tiempos del primer bosquejo. c) Ruta crítica para una duración correspondiente a la solución normal.

Ahora existen dos cifras en cada óvalo que dan el tiempo más próximo y el tiempo más remoto de terminación de cada evento; la diferencia entre ambos números es la holgura disponible para retrasos y se le llama flotante. Cuando los números en cada casilla son los mismos significa que no existe este flotante y estos son los hechos críticos que deben realizarse de acuerdo con la programación, si es que el proyecto debe terminarse en el tiempo mínimo total. La ruta que une a los eventos críticos se le llama ruta crítica.

Una vez que se ha establecido la ruta crítica a través de una red, puede resultar provechoso comprobar el efecto de otro método de construcción para una actividad de red en su conjunto, esto se logra reduciendo el tiempo de algunas actividades ya sea por que se utiliza un equipo o un método de construcción diferente sin tomar en cuenta costos, y esto hará que el tiempo más próximo de terminación se reduzca, y finalmente hará que la ruta crítica cambie.

## **2.9 Tiempos de actividad y tiempos flotantes**

Cuando ya se han obtenido los tiempos próximos y remotos de terminación para los eventos del proyecto, lo siguiente es encontrar todos los tiempos de actividad y los tiempos flotantes.

El tiempo flotante puede dividirse de varias formas. La cantidad total de tiempo en que puede demorarse la iniciación de una actividad sin ocasionar que el proyecto dure más tiempo se denomina tiempo flotante total (TFT). Este retraso puede ocasionar otros retrasos en las actividades que le siguen, pero en general no retardaran el proyecto. El tiempo flotante libre (TFL) es la cantidad de tiempo por el cual puede demorarse el comienzo de una actividad sin interferir con el de las actividades que la suceden.

Para determinar los flotantes disponibles para cualquier actividad, es necesario calcular los tiempos más próximos y remotos de iniciación, y también los tiempos de terminación más

próximos y más remotos a partir de los datos de la red. El tiempo más próximo de iniciación es el tiempo en que puede comenzar, y el tiempo más remoto de iniciación es en el que debe comenzar si se quiere obtener la duración mínima del proyecto.

La relación entre estos tiempos de actividad en los flotantes definidos pueden expresarse como ecuaciones simples. Así para cualquier actividad el tiempo:

$$\text{Más próximo de iniciación} = \text{más próximo de terminación de su evento de cola} \quad (2.1)$$

$$\text{Más próximo de terminación} = \text{más próximo de iniciación} + \text{su duración} \quad (2.2)$$

$$\text{Más remoto de terminación} = \text{más remoto de terminación de su evento inicial} \quad (2.3)$$

$$\text{Más remoto de iniciación} = \text{más remoto de terminación} - \text{su duración} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Flotante total} &= \text{más remoto de terminación} - \text{más próximo de terminación} \quad (2.5) \\ &= \text{mas remoto de iniciación} - \text{mas próximo de iniciación} \end{aligned}$$

$$\text{Flotante libre} = \text{al más próximo de iniciación de la actividad siguiente} - \text{su propio TPT} \quad (2.6)$$

## 2.10 Programación de actividades

Las relaciones entre las actividades ya se pueden analizar y tomar las decisiones relacionadas con los tiempos totales de los trabajos de construcción.

La información que se obtiene en la etapa de programación es de gran importancia para el director de obra en cuanto al control del proyecto, y es igualmente útil para el planificador. El conocimiento del tiempo flotante disponible permite el desplazamiento de las actividades dentro

del programa, siempre dentro de sus límites de tiempo flotante, para ayudar a normalizar el trabajo y los requerimientos de la planta. Esta es otra ventaja importante que la industria de la construcción ha encontrado en el uso del método de ruta crítica; la manipulación correcta de los tiempos flotantes libres permite la realización lógica y matemática de un plan de construcción con menos imprevistos sin exceder el tiempo total del proyecto.

<i>Actividad</i>										
<i>Elemento</i>	<i>Flecha</i>	<i>Duración</i>	<i>TPI</i>	<i>TRI</i>	<i>TPT</i>	<i>TRT</i>	<i>TFT</i>	<i>TFL</i>	<i>TFI</i>	<i>Observaciones</i>
<i>A</i>	1-2	10	0	0	10	10	0	0	0	Crítica
<i>B</i>	1-3	10	0	6	10	16	6	0	6	—
<i>C</i>	2-4	23	10	10	33	33	0	0	0	Crítica
<i>I</i>	2-6	13	10	29	23	42	19	0	19	—
<i>G</i>	3-4	15	10	18	25	33	8	8	0	—
<i>H</i>	3-5	17	10	16	27	33	6	6	0	—
Actividad ficticia	4-5	0	33	33	33	33	0	0	0	Crítica
<i>D</i>	4-7	12	33	42	45	54	9	2	7	—
<i>E</i>	5-7	14	33	40	47	54	7	0	7	—
<i>F</i>	5-9	30	33	33	63	63	0	0	0	Crítica
<i>J</i>	6-7	12	23	42	35	54	19	12	7	—
<i>L</i>	6-8	1	23	54	24	55	31	0	31	—
<i>K</i>	7-9	9	47	54	56	63	7	7	0	—
<i>M</i>	8-9	8	24	55	32	63	31	31	0	—

**Figura 2.6** Programación de actividades

### 2.11 Como iniciar una red

El primer paso en la preparación de una red consiste en la división del proyecto en actividades. La mejor forma de acomodar las actividades es enumerándolas en columnas. No es necesario utilizar un orden específico pero si es importante la clasificación por oficios, habilidades, ubicaciones y requerimientos de planta.

El segundo paso es formular la lógica de la construcción, o el orden específico de las actividades. Esto consiste en la declaración precisa acerca de las relaciones entre ellas. No tiene



dificultad obtener el orden general de actividades dentro del proyecto, sin embargo el orden específico es más difícil y requiere un estudio más cuidadoso.

Una idea para la buena realización del orden específico consiste en determinar las restricciones evidentes, tanto físicas como de seguridad, las restricciones del personal y de otros recursos y la determinación de la gerencia o dirección. Las restricciones físicas llevan a las cadenas de actividades, simplemente determinadas. La consideración de otras restricciones y la determinación de los requerimientos físicos conducen generalmente a la ramificación y entrecruce de las cadenas en las redes. Con frecuencia es útil tabular constantemente las actividades; observando las actividades que deben preceder y las que deben seguir cada actividad, como también las actividades que pueden llevarse a cabo de forma simultánea. La disposición de la red se lleva a cabo mediante ensayos de prueba y error.

### **2.12 Método de programación (PERT)**

El objetivo de los sistemas tipo PERT consiste en ayudar en la planeación y el control, por lo que no implica mucha optimización directa. Algunas veces el objetivo primario es determinar la probabilidad de cumplir con fechas de entrega específicas. También identifica aquellas actividades que son más probables que se conviertan en cuellos de botella y señala, por ende, en que puntos debe hacerse el mayor esfuerzo para no tener retrasos. Un tercer objetivo es evaluar el efecto de los cambios del programa. Por ejemplo, se puede valorar el efecto de un posible cambio en la asignación de recursos de las actividades menos críticas a aquellas que se identificaron con cuellos de botella. Otra aplicación importante es la evaluación del efecto de desviarse de lo programado.

Todos los sistemas tipo PERT emplean una red de proyecto para visualizar gráficamente la interrelación entre sus elementos. Esta representación del plan de un proyecto muestra todas las relaciones de procedencia, respecto al orden en que se deben realizar las actividades. Esta red indica que la excavación debe hacerse antes de poner los cimientos y después los cimientos deben completarse antes de colocar las paredes. Una vez que se levantan las paredes se pueden realizar tres actividades en paralelo. Al seguirla red hacia delante se ve el orden de las tareas subsecuentes.

En la terminología de PERT, cada arco de la red representa una actividad, es decir, una de las tareas que requiere el proyecto, cada nodo representa un evento que por lo general se define con el momento en que se terminan todas las actividades que llegan a ese nodo, Las puntas de flecha indican la secuencia en la que debe ocurrir cada uno de esos eventos. Lo que es mas, un evento debe preceder a la iniciación de las actividades que llegan a ese nodo. (En la realidad, con frecuencia se pueden traslapar etapas sucesivas de un proyecto, por lo que la red puede representar una aproximación idealizada del plan de un proyecto.)

El nodo hacia el que todas las actividades se dirigen es el evento que corresponde a la terminación desde su concepción, o bien, si el proyecto ya comenzó, el plan para su terminación. En él ultimo caso, cada nodo de la red sin arcos que llegan representa el evento de continuar una actividad en marcha o el evento de iniciar una nueva actividad que puede comenzar en cualquier momento.

Cada arco juega un doble papel, el de representar una actividad y el de ayudar a representar las relaciones de procedencia entre las distintas actividades. En ocasiones, se necesita un arco para definir las relaciones de procedencia aun cuando no haya una actividad real que representar. En este caso, se introduce una actividad ficticia que requiere un tiempo cero, en donde el arco que representa esta actividad ficticia se muestra como una flecha punteada que

indica esa relación de procedencia. Por ejemplo, considérese el arco 5-8 que representa una actividad ficticia; el único objeto de este arco es indicar que la colocación de la tubería debe estar terminada antes de poder comenzar los exteriores. Una regla común para construir este tipo de redes es que dos nodos no pueden estar conectados directamente por más de un arco. Las actividades ficticias también se pueden usar para evitar violar esta regla cuando se tienen dos o más actividades concurrentes. El único propósito de este arco es indicar que debe terminarse la colocación de pisos antes de instalar los acabados interiores sin tener dos arcos del nodo 9 al nodo 12.

Una vez desarrollada la red de un proyecto, el siguiente paso es estimar el tiempo que se requiere para cada actividad. Estos tiempos se usan para calcular dos cantidades básicas para cada evento, a saber, su tiempo más próximo y su tiempo más lejano. El tiempo más próximo para un evento es el tiempo (estimado) en el que ocurrirá el evento si las actividades que lo proceden comienzan lo más pronto posible. Los tiempos más próximos se obtienen al efectuar una pasada hacia delante a través de la red, comenzando con los eventos iniciales y trabajando hacia delante en el tiempo, hasta los eventos finales, para cada evento se hace un cálculo del tiempo en el que ocurrirá cada uno, si cada evento precedente inmediato ocurre en su tiempo más próximo y cada actividad que interviene consume exactamente su tiempo estimado. La iniciación del proyecto se debe etiquetar con el tiempo 0, este proceso se muestra en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** *Calculo de los tiempos más próximos para el ejemplo de la construcción de una casa.*

Evento	Evento Inmediatamente Precedente	Tiempo más próximo + Tiempo de la actividad	Tiempo = más próximo máximo
1	—	—	0
2	1	0 + 2	2
3	2	2 + 4	6
4	3	6 + 10	16
5	4	16 + 4	20
6	4	16 + 6	22
7	4	16+7	25
	5	20+5	
8	5	20+0	29
	6	22+7	
9	7	25+8	33
10	8	29+9	38
11	9	33+4	37
12	9	33+5	38
	11	37+0	
13	10	38+2	44

**Fuente:** *Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman (1993) Introducción ala Investigación de Operaciones, Quinta edición, Editorial McGraw Hill, México.*

El tiempo más lejano para un evento es el último momento (estimado) en el que puede ocurrir sin retrasar la terminación del proyecto más allá de su tiempo más próximo.

En este caso los tiempos más lejanos se obtienen sucesivamente para los eventos al efectuar una pasada hacia atrás a través de la red, comenzando con los eventos finales y trabajando hacia atrás en el tiempo hasta los iniciales. Para cada evento el cálculo del tiempo final en el que puede ocurrir un evento de manera que los que le siguen ocurran en su tiempo más lejano, si cada actividad involucrada consume exactamente su tiempo estimado. Este proceso se ilustra en la tabla 2.1, en donde 44 días es el tiempo más próximo y el tiempo más lejano para la terminación del proyecto de construcción de la casa. Los tiempos más lejanos para la terminación del proyecto de construcción de la casa.

Sea la actividad  $(i, j)$  la actividad que va del evento  $i$  al evento  $j$  en la red del proyecto. La holgura para un evento es la diferencia entre su tiempo más lejano y su tiempo más próximo. La holgura para una actividad  $(i, j)$  es la diferencia entre [ el tiempo más lejano del evento ] y [el tiempo más próximo del evento  $i$  más el tiempo estimado para la actividad].

Así, si se supone que todo lo demás marcha a tiempo, la holgura para un evento indica cuanto retraso se puede tolerar para llegar a ese evento sin retrasar la terminación del proyecto, y la holgura para una actividad indica lo mismo respecto a un retraso en la terminación de esa actividad. En la tabla 2.3 se ilustran los cálculos de estas holguras para el proyecto de la construcción de una casa.

Resulta interesante observar en la tabla 2.3 que mientras que todos los eventos sobre la ruta crítica (inclusive el 4 y el 7) necesariamente tienen holgura cero, no es así para la actividad (4,7), ya que su tiempo estimado es menor que la suma de los tiempos estimados para las actividades (4,5) y (5,7). En consecuencia, estas últimas actividades están en la ruta crítica, pero la actividad (4,7) no lo está.

**Tabla 2.2.** *Calculo de los tiempos más lejanos para el ejemplo de la construcción de una casa*

Evento	Evento Inmediatamente Siguiente	Tiempo más lejano - Tiempo de la actividad	Tiempo = más lejano o mínimo
13	—	—	44
12	13	44-6	38
11	12	38-0	38
10	13	44-2	42
9	12	38-5	33
	11	38-4	
8	10	42-9	33
7	9	33-8	25
6	8	33-7	26
5	8	33-0	20
	7	25-5	
4	7	25-7	16
	6	26-6	
	5	20-4	
3	4	16-10	6
2	3	6-4	2
1	2	2-2	0

**Fuente:** *Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman (1993) Introducción a la Investigación de Operaciones, Quinta edición, Editorial McGraw Hill, México.*

Esta información sobre los tiempos más cercanos y más lejanos, las holguras y la ruta crítica, es invaluable para el administrador del proyecto. Entre otras cosas, le permite investigar el efecto de posibles mejoras en la planeación para determinar en donde debe hacerse un esfuerzo especial para mantenerse y evaluar el impacto de los retrasos

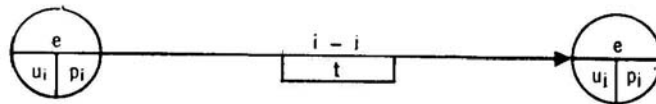
**Tabla 2.3.** *Calculo de las holguras para el ejemplo de la construcción de una casa.*

Evento	Holgura	Actividad	Holgura
1	$0 - 0 = 0$	(1,2)	$2 - (0+2) = 0$
2	$2 - 2 = 0$	(2,3)	$6 - (2+4) = 0$
3	$6 - 6 = 0$	(3,4)	$16 - (6+10) = 0$
4	$16 - 16 = 0$	(4,5)	$20 - (16+4) = 0$
5	$20 - 20 = 0$	(4,6)	$26 - (16+6) = 4$
6	$26 - 22 = 4$	(4,7)	$25 - (16+7) = 2$
7	$25 - 25 = 0$	(5,7)	$25 - (20+5) = 0$
8	$33 - 29 = 4$	(6,8)	$33 - (22+7) = 4$
9	$33 - 33 = 0$	(7,9)	$33 - (25+8) = 0$
10	$42 - 38 = 4$	(8,10)	$42 - (29+9) = 4$
11	$38 - 37 = 1$	(9,11)	$38 - (33+4) = 1$
12	$38 - 38 = 0$	(9,12)	$38 - (33+5) = 0$
13	$44 - 44 = 0$	(10,13)	$44 - (38+2) = 4$
		(12,13)	$44 - (38+6) = 0$

**Fuente:** *Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman (1993) Introducción ala Investigación de Operaciones, Quinta edición, Editorial McGraw Hill, México.*

### 2.12.1 Graficas PERT

La gráfica PERT es una gráfica original de redes no medidas que contiene los datos de las actividades representadas por flechas que parten de un evento  $i$  y terminan en un evento  $j$  (figura 2.7).



*Figura 2.7 Grafica de redes no medidas*

En la parte superior de la flecha se indica el número de identificación, generalmente los números de los eventos ( $i-j$ ). En la parte inferior aparece dentro de un rectángulo la duración estándar ( $t$ ) de la actividad. En la mitad superior del evento se anota el número progresivo, en el cuarto inferior izquierdo la última lectura del proyecto y en el cuarto inferior derecho la primera lectura del proyecto.

Esta gráfica tiene como ventaja la de informar las fechas más tempranas y más tardías de iniciación y terminación de cada actividad, sin tener que recurrir a la matriz de holguras (figura 2.8).

### 2.12.2. Enfoque de tres estimaciones de PERT.

Hasta ahora se ha supuesto implícitamente que se puede obtener estimaciones con una exactitud razonable del tiempo requerido para cada actividad del proyecto. En la realidad, con frecuencia existe bastante incertidumbre sobre cuáles serán estos tiempos; de hecho se trata de una variable aleatoria que tiene cierta distribución de probabilidad. La versión original de PERT toma en cuenta esta incertidumbre usando tres tipos diferentes de estimaciones para los tiempos de las



actividades, con el fin de obtener información básica sobre su distribución de probabilidad. Esta información para todos los tiempos de las actividades se utiliza para estimar la probabilidad de terminar el proyecto en la fecha programada.

Las tres estimaciones empleadas por PERT para cada actividad son una estimación más probable, una estimación optimista y una estimación pesimista. La estimación más probable (denotada por  $m$ ) intenta ser la estimación más realista del tiempo que puede consumir una actividad. En términos estadísticos, es una estimación de la moda (el punto más alto) de la distribución de probabilidad para el tiempo de la actividad. La estimación optimista (denotada por  $a$ ) procura ser el tiempo poco probable pero posible si todo sale bien; es en esencia una estimación de la cota inferior de la distribución de la probabilidad. Por último, se intenta que la estimación pesimista (denotada por  $b$ ) sea el tiempo poco probable pero posible si todo sale mal. En términos estadísticos, se trata en esencia de una estimación de la cota superior de la distribución de probabilidad. En la figura 3 se muestra la localización ideal de estas tres estimaciones con respecto a la distribución de probabilidad.

#### Tiempo transcurrido

Modelo de distribución de probabilidad para los tiempos de las actividades en el enfoque de tres estimaciones de PERT:  $m$  = estimación probable,  $a$  = estimación optimista y  $b$  = estimación pesimista.

Se hacen dos suposiciones para convertir  $m$ ,  $a$  y  $b$  en estimaciones del valor esperado ( $t_e$ ) y la varianza ( $\sigma^2$ ) del tiempo que requiere la actividad. Una suposición es que  $\alpha$ , la desviación estándar (raíz cuadrada de la variancia), es igual a un sexto del intervalo de los requerimientos de tiempo razonablemente posibles; esto es:

$$\sigma^2 = \left[ \frac{1}{6}(b-a) \right]^2$$

.....EC (2.1)

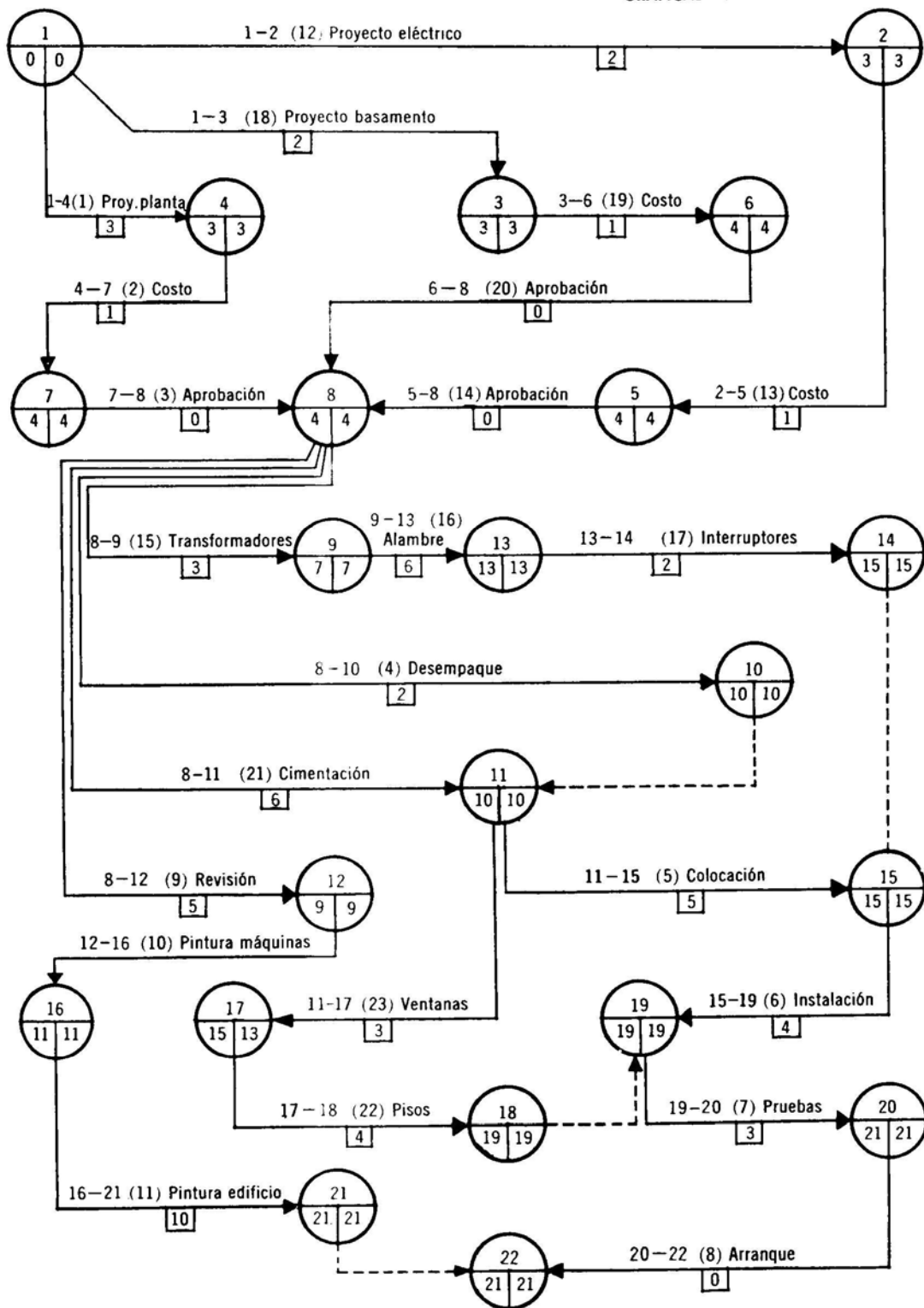


Figura 2.8 Se ve ahora cómo se presenta la ampliación de la fábrica por medio de una gráfica PERT.

Es la estimación deseada de la variancia. El razonamiento para hacer esta suposición es que se considera que las colas de muchas distribuciones de probabilidad (como en la distribución normal) están mas o menos a tres desviaciones estándar de la media, de manera que existe una dispersión de alrededor de seis desviaciones estándar entre las colas, por ejemplo, las cartas de control que se usan normalmente para el control estadístico de la calidad están construidas de manera que la dispersión entre los límites de control se estima en seis desviaciones estándar.

Para obtener la estimación del valor esperado ( $t_e$ ), también es necesaria una suposición sobre la forma de la distribución de probabilidad, se supone que la distribución es (al menos aproximadamente) una distribución beta. Este tipo de distribución que es razonable para este propósito. Si se usa este modelo el valor esperado del tiempo de una actividad es aproximadamente

$$t_e = \frac{1}{3} \left[ 2m + \frac{1}{2}(a + b) \right]. \quad \text{.....EC (2.2)}$$

Nótese que el medio del intervalo  $(a + b)/2$  se encuentra entre  $a$  y  $b$  de manera que  $t_e$  es la media aritmética ponderada de la moda y la mitad del intervalo, con un peso de dos tercios para la moda. Aunque la suposición de una distribución beta es arbitraria, sirve para el propósito de localizar el valor esperado a  $m$ ,  $a$  y  $b$  de una manera que parece ser razonable.

Después de calcular el valor esperado y la variancia estimados para cada una de las actividades, se necesitan tres suposiciones adicionales (o aproximaciones) para poder calcular la probabilidad de terminar el proyecto a tiempo. Una es que los tiempos de las actividades son estadísticamente independientes. Una segunda es que la ruta crítica (en términos de los tiempos

esperados) siempre requiere un tiempo total mayor que cualquier otra ruta. Esto implica que el valor esperado y la variancia, es sencillo encontrar la probabilidad de que esta variable aleatoria normal (tiempo del proyecto) sea menor que el tiempo de terminación programado.