

### **3. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE PLANEACIÓN Y CONTROL DE PROYECTOS**

#### **3.1 Introducción**

Para poder realizar un proyecto en tiempo y costo adecuados es necesario elaborar un plan en base al cual se pueda programar y controlar toda la obra.

Partiendo de aquí se puede entender como planeación la formulación de un curso de acción que sirva de guía para la realización del proyecto<sup>1</sup>. El gerente de proyectos debe elaborar un plan de trabajo escrito en el que se identifique el trabajo que necesita hacerse, quién va a hacerlo, cuándo debe hacerse y cómo debe hacerse, y bajo que costos. Además de esto, es necesario también conocer las condiciones de las vías de comunicación, si es que existen, las condiciones climáticas, los posibles centros de obtención de materiales, la mejor forma de obtener la mano de obra, los medios de transporte presentes en el lugar, entre otros factores. Es decir, los recursos y factores externos del proyecto.

Es importante determinar en este plan los eventos relevantes, así como las posibles restricciones y limitaciones que pudieran presentarse durante el desarrollo del proyecto, (como pueden ser el conseguir un perfil precolado de concreto), puesto que si se les tiene perfectamente identificados, el gerente de proyectos podrá tomar las decisiones a tiempo y solucionar en forma óptima los problemas que se susciten. Además de identificar los procesos constructivos de difícil ejecución.

Después de tener elaborada la planeación de la obra se procede a realizar la programación de la misma. Puede entenderse como programación a la elaboración de una red o diagrama en el que se esquematicen todas las actividades en las que se divide el proyecto, especificando el tipo de relación entre una y otra, así como su duración. Con esta programación se tiene un tiempo estimado de terminación del proyecto<sup>1</sup>.

Tanto la planeación como la programación de una obra se realizan antes de comenzar el proyecto, y son herramientas importantes para poder controlar el mismo. Aunque a veces es necesario reprogramar y replanear.

---

<sup>1</sup> Garold D. Oberlender (1993), Project Management for Engineering and Construction, editorial McGrawHill, USA.

El control de una obra consiste en medir el avance de ésta, registrarlo y compararlo continuamente con lo estimado en la programación del proyecto. Este es un proceso continuo y le permite al gerente de proyectos prever los posibles cambios en cuanto a la magnitud de la obra, posibles problemas y por ende cambios en su costo y tiempo de terminación<sup>1</sup>. Puede darse el caso de que se requiere en forma extraordinaria hacer un proceso constructivo que no se tenía contemplado, de esta manera, con ayuda de la programación del proyecto, puede elaborarse una nueva programación, minimizando el retraso de la obra así como los costos extras que pudieran generarse. Y también, con esto programar un nuevo flujo de efectivo.

Lo más importante en el control de un proyecto es administrar el tiempo y el costo del mismo. Para administrar el tiempo de este proyecto se utilizan las diversas técnicas de programación que se explican en el apartado siguiente. La parte del costo se menciona posteriormente.

### 3.2 Técnicas de Programación

Existen diversos tipos de técnicas de programación, unas son muy sencillas en su elaboración y fáciles de interpretar, pero tienen ciertas limitaciones. Otras son bastantes útiles pero complejas en su elaboración.

Las técnicas más comúnmente usadas en la programación de una obra son:

- Diagramas de barras
- Curvas de producción acumulada
- Método de la Ruta crítica (Critical Path Method, CPM)
- Red de precedencias
- PERT (Program Evaluation Review Technique)
- Diagramas de tiempo y espacio

### 3.2.1 Diagrama de barras

Este diagrama proviene de Henry L. Gantt, un pionero en la aplicación del método científico en la producción industrial. Este es un método gráfico y muy fácil de entender.

El concepto básico del diagrama de barras es la representación de una actividad en forma de una barra cuya longitud representa la duración estimada para dicha actividad. Esta misma barra puede usarse también para graficar el avance real de la actividad a través del tiempo.

De esta manera el diagrama de barras funciona como un modelo de planeación y de control al mismo tiempo. La longitud de la barra tiene por lo tanto dos diferentes significados, una es la duración estimada de la actividad, y por otro lado el progreso real de cada actividad.

Como en toda técnica de programación, los diagramas de barras son desarrollados descomponiendo el trabajo en diversos componentes.

En la elaboración de un diagrama de barras se coloca en la columna uno el nombre de la actividad, en la siguiente columna se coloca la duración de cada actividad, normalmente en días, y a continuación se dibujan los diagramas de barras dentro de una escala de tiempo. Un ejemplo básico de este tipo de diagrama se muestra a continuación.

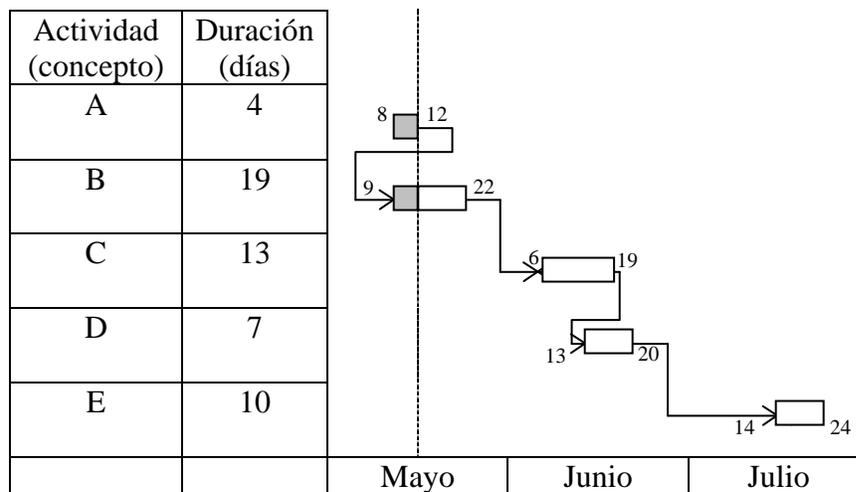


Figura 3.1 Diagrama de barras de un proyecto. (Elaboración propia.)

Las partes sombreadas de las barras representan el progreso del proyecto a la mitad del mes de mayo.

A pesar de que en el diagrama de barras sí se pueden relacionar las actividades con flechas, tal como se muestra en la figura 3.1, no se logra apreciar la ruta crítica, ni se puede percibir de manera precisa una secuencia lógica del grupo de actividades. Por otro lado, es posible indicar en un diagrama de barras, la productividad de cada una de las actividades. Esto se logra utilizando más de una barra para cada actividad, en la que una represente la duración estimada, y en otra se grafique el avance real de dicha actividad. Esto se hace con la finalidad de controlar la obra, sin embargo, es una herramienta muy simple, y no permite detectar a detalle la rapidez o retraso general en la obra, y sobretodo, no deja ver si una actividad está atrasada, qué efecto tendrá en la duración total del proyecto.

### 3.2.2 Curvas de producción acumulada

Para poder determinar la tasa de producción o la velocidad del avance del proyecto es posible elaborar una curva de producción. Esta curva representa el avance acumulado del proyecto a través del tiempo. Esta curva relaciona unidades de producción en el eje “y”, contra unidades de tiempo en el eje “x”. La pendiente de la curva relaciona el incremento en unidades de producción en la ordenada, con el incremento del tiempo en la abscisa, por lo tanto la pendiente de la curva representa el número de unidades producidas en un incremento de tiempo, esto es la tasa de producción. Debido a que al inicio del proyecto el avance es lento por los procesos de instalación de las condiciones de trabajo, el acoplamiento de los trabajadores, así como el almacenamiento de los materiales necesarios, por lo que se tiene una tasa de producción baja. A la mitad del proyecto se tiene un avance más rápido, pero nuevamente al final del proyecto se vuelve lento el proceso de construcción. Estos nos lleva a tener una forma de “s” alargada, como se muestra a continuación.

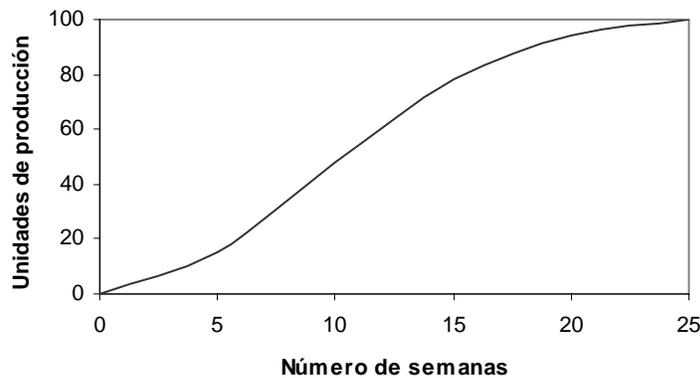


Figura 3.2 Esquematización de una curva “s”. (Elaboración propia.)

Estas curvas pueden aplicarse para todo el proyecto en general, o en su defecto por grupos de actividades. En el primer caso se puede observar la velocidad de avance del proyecto, y para su elaboración se parte de la ayuda del diagrama de barras.

Por ejemplo, suponiendo que se tiene un proyecto pequeño que se completaría en un mes, si se tienen tres actividades, al final de la primer semana se suma el porcentaje de avance de todas las actividades que terminaron en esa semana, para el final de la segunda semana se suma el porcentaje de avance de todas las actividades que concurren en ese tiempo y así sucesivamente, obteniendo un control de avance real contra el estimado por semana.

A continuación se explica el cálculo del porcentaje de avance de la primer semana de un proyecto de tres actividades.

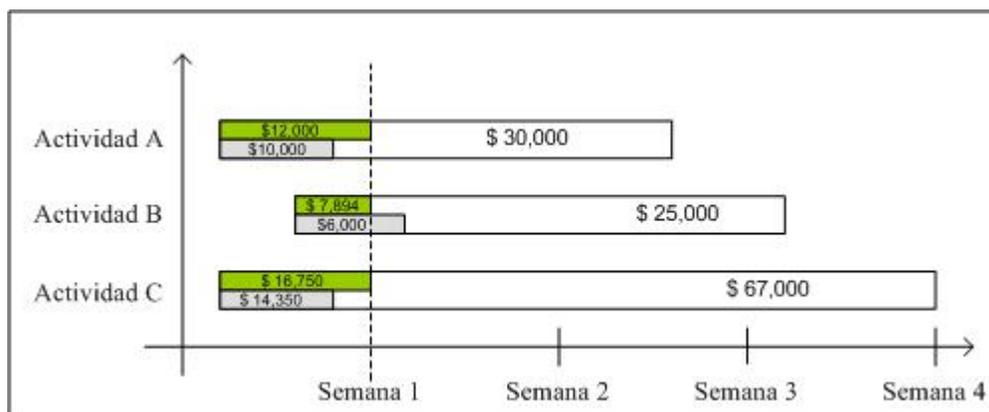


Figura 3.3 Progreso planeado contra progreso actual para la semana 1. (Elaboración propia)

En la figura 3.3, la parte de color verde representa el progreso planeado, mientras que el recuadro gris representa el progreso actual al final de la primer semana. Como se observa, las actividades A y C sufren un retraso, mientras que la actividad B avanza más allá de lo estimado en la planeación. Teniendo que el costo total del proyecto es de \$122,000, se pueden hacer los siguientes cálculos:

Tabla 3.1 Comparación de porcentajes de avance planeado y real de un proyecto de 3 actividades.

	Actividad A	Actividad B	Actividad C	Total	% de avance
Avance planeado	12000.00	7894.74	16750.00	36644.74	30.04
Avance real	10000.00	6000.00	14350.00	30350.00	24.88

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculados estos valores se puede obtener un diagrama de curva S, que nos compare el avance planeado contra el real. Esto se ilustra a continuación.

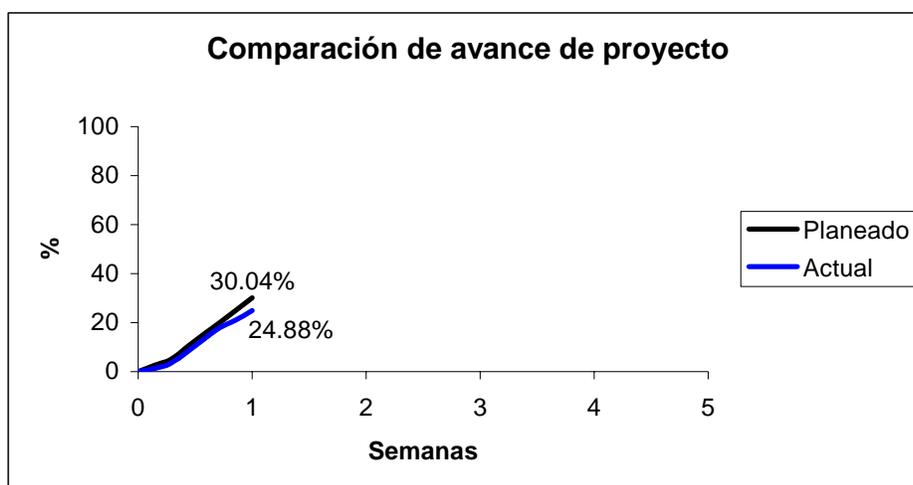


Figura 3.4 Comparación de curvas de producción planeada y actual. (Elaboración propia).

Se pueden también generar curvas por grupos de actividades en vez de todo el proyecto. Éstas curvas permiten controlar las actividades de tal forma que el desarrollo de una no vaya a interrumpir el avance de la que le sigue. Es decir, en una serie de actividades, unas dependientes de otras, la actividad B debe avanzar a cierto ritmo siempre atrás de la actividad A de la cual depende, porque de lo contrario, si la actividad B alcanza a la actividad A, se tiene que detener, y esperar a que la actividad A le genere otra vez condiciones de trabajo a la actividad B. Esto se ve por ejemplo en un proceso de colado de losas. Es necesario preparar la cimbra, armar, y luego colar. Si el proceso de colado avanza

a un ritmo mayor al de armado o el de cimbrado, llegará un momento en que la gente encargada del colado tenga que detenerse, mientras espera que la cimbra o el armado este listo. Esto se puede observar claramente en la figura 3.5.

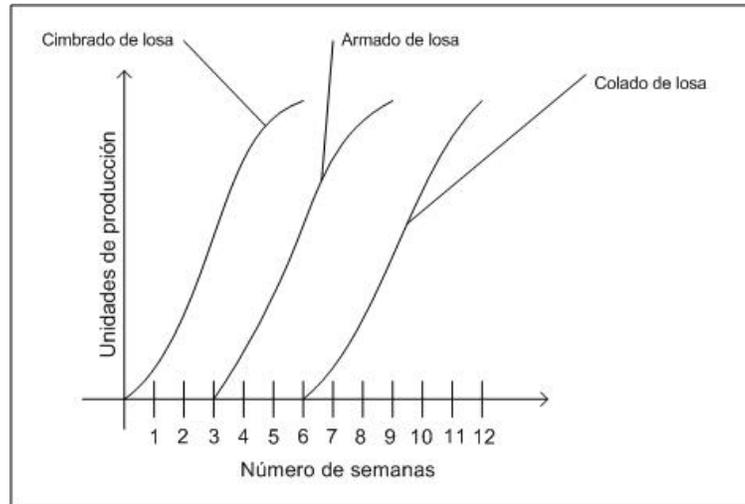


Figura 3.5 Curvas S para secuencia de actividades. (Elaboración propia)

Los procesos deben ser coordinados de tal manera que se eviten las intersecciones entre las curvas de producción. Puesto que estas intersecciones implican como en el caso del ejemplo, un retraso en la actividad o actividades subsecuentes. Ver figura 3.6.

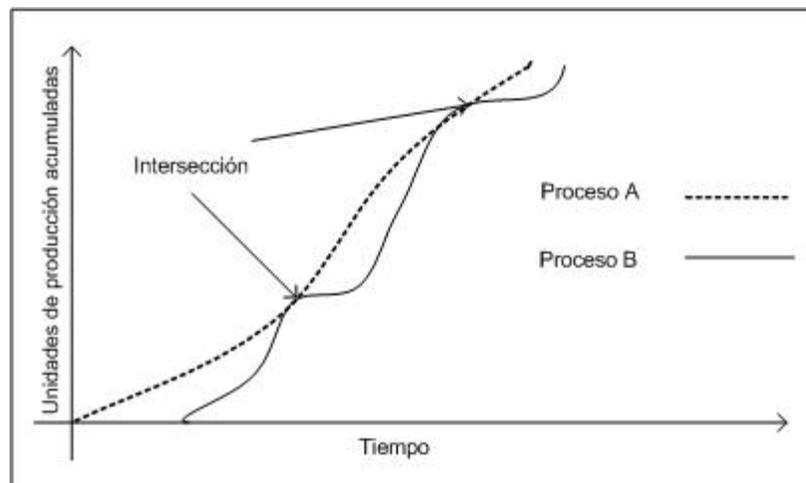


Figura 3.6 Intersección entre dos curvas de avance. (Elaboración propia)

Estos puntos de intersección indican que el proceso B no puede continuar hasta cierto tiempo después de que el proceso A le ha generado las condiciones de trabajo necesarias.

### 3.2.3 CPM (Critical path method) Método de la ruta crítica

Existen dos tipos de redes dentro del método de la ruta crítica:

- a. Diagrama de flechas.
- b. Redes de precedencia.

Tanto el diagrama de flechas como las redes de precedencia nos sirven para determinar la ruta crítica de un proyecto. Dado que las dos tipos de redes se calculan de manera diferente, las redes de precedencia merecen una mención especial.

#### a. Diagrama de flechas

Este método consiste en elaborar una red o diagrama, en el que se muestran todas las actividades pertenecientes a la elaboración de un proyecto. Dicha red muestra una secuencia lógica en la que debe realizarse dicho proyecto, y se especifica la interdependencia entre una actividad y otra. En este tipo de red las actividades se representan mediante flechas, mientras que la unión entre una actividad y otra se representa con la ayuda de nodos.

Antes de elaborar una red es necesario establecer una secuencia general para la realización del proyecto. Una vez conocida la secuencia, se procede a dividir el proyecto en distintas actividades o tareas. Por último se estima una duración para cada actividad o tarea.

Para estimar la duración de cada una de las actividades se puede recurrir al personal de campo, así como a los registros que se tengan de proyectos anteriores. En mucho influye la experiencia que tenga el gerente de proyectos a la hora de asignar las duraciones de cada actividad. Además de información procedente del departamento de costos y estimaciones.

Para elaborar la red se necesita conocer todas las relaciones que existentes entre una actividad y otra. Se pueden tener diferentes tipos de relaciones: Dependencia directa, dependencia compartida, dependencia múltiple, y efecto de cruz. Por ejemplo:

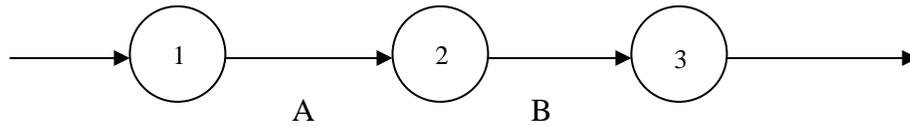


Figura 3.7 Dependencia directa. (Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.)

En la figura 3.7 la actividad B depende de la realización de la actividad A. La actividad A es el predecesor de B, y la actividad B es el sucesor de A.

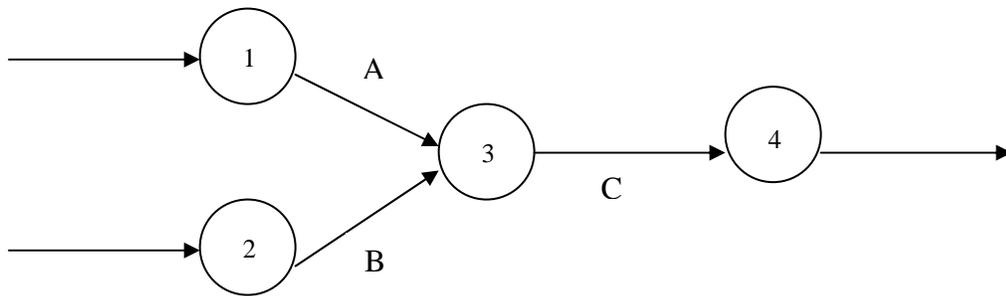


Figura 3.8 Dependencia compartida. (Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.)

En la figura 3.8 la actividad C depende tanto de la realización de A, como de la realización de B. Una actividad puede depender de la realización de más de dos actividades.

Las actividades A y B son los predecesores de C. La actividad C es sucesor de A y de B.

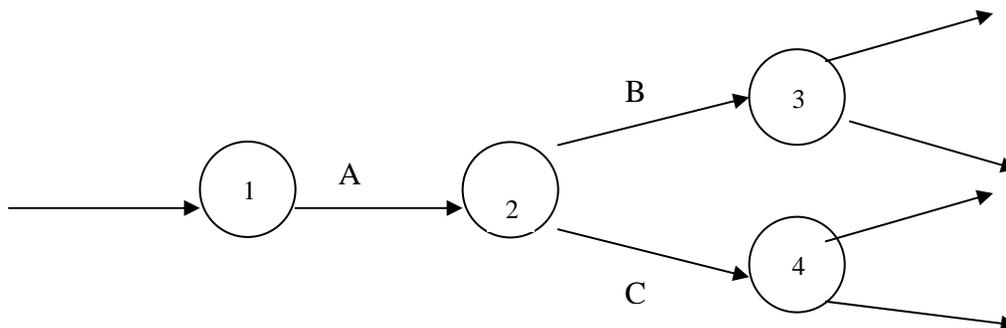


Figura 3.9 Dependencia múltiple. (Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.)

En la figura 3.9, las actividades B y C dependen de la realización de la actividad A, esto es, que hasta que quede completada la actividad A es cuando podrán realizarse las actividades B y C. En una red pueden depender más de dos actividades de la realización de su actividad precedente.

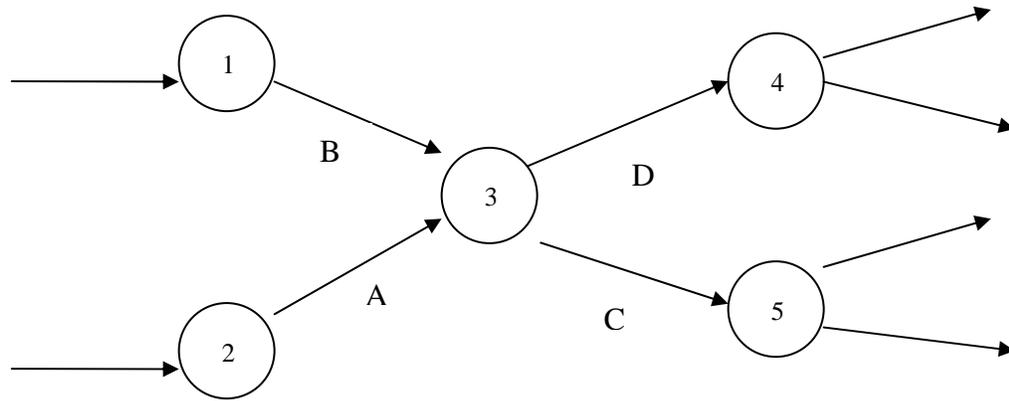


Figura 3.10 Efecto de cruz (Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.)

En la figura 3.10 tanto la actividad C como la actividad D dependen de la realización de las actividades A y B. Aún cuando este completada la actividad A, sino está completada la actividad B no puede realizarse ninguna de las actividades posteriores.

A la hora de elaborar la red se puede presentar ciertos problemas al intentar expresar la relación entre unas actividades y otras.

Puede suceder que dos actividades provengan y confluyan hacia un mismo nodo, por lo tanto a la hora de elaborar el diagrama es necesario agregar un tercer nodo y se hace uso de actividades ficticias. Este tipo de actividades ficticias carecen de duración y se representa mediante líneas punteadas. En este caso es necesario usar la actividad ficticia debido a que pueden surgir problemas a la hora de calcular los tiempos próximos de inicio y terminación, así como lo tiempos remotos de inicio y terminación de las actividades. Este tipo de cálculos se explican más adelante. El uso de las actividades ficticias se ejemplifica a continuación.

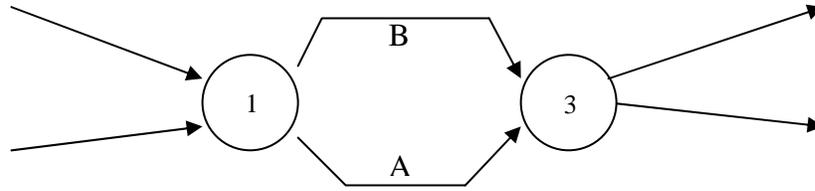


Figura 3.11 Uso incorrecto de actividades ficticias' (Charles Lenzion (2002), Apuntes de Project Management.)

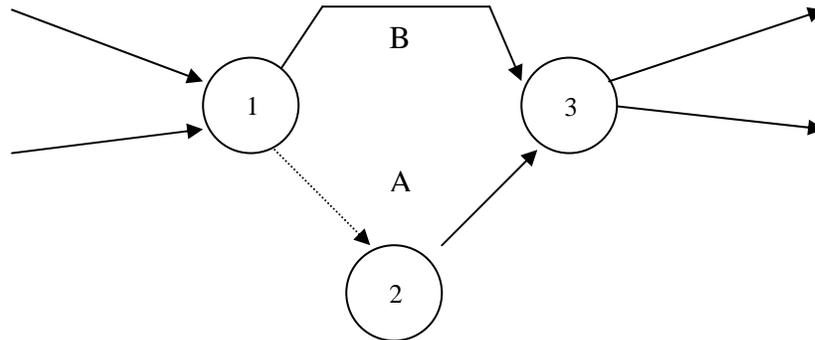


Figura 3.12 Uso correcto de actividades ficticias. (Charles Lenzion (2002), Apuntes de Project Management.)

Otro caso puede ser cuando hay una dependencia doble, es decir, cuando una actividad depende de la realización de dos actividades, pero a la vez, una de esas actividades tiene otra actividad que la sucede. Ver la siguiente figura:

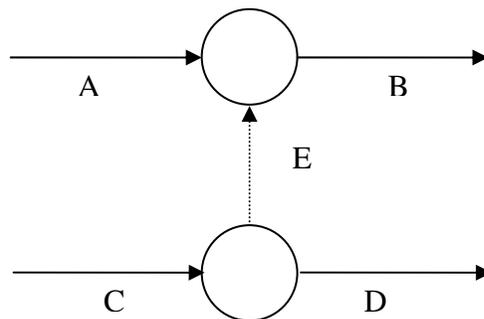


Figura 3.13 Uso de actividades ficticias para dependencia doble de actividades. (Charles Lenzion (2002), Apuntes de Project Management.)

La actividad E en la figura 3.13 es una actividad ficticia y no tiene duración. La actividad B no puede proceder hasta que ambas actividades, tanto la A como la C estén completadas. La actividad D por otro lado, sólo necesita de la realización de C, puesto que no depende para nada de A.

Para saber cuál es la ruta crítica es necesario calcular los tiempos próximos de inicio TPI, así como los tiempos remotos de inicio, TRI. También es necesario calcular los tiempos flotantes, es decir, el tiempo en el que se puede retrasar una actividad sin afectar la duración total del proyecto.

Para calcular estos tiempos se procede con un cálculo hacia adelante, y otro hacia atrás. Haciendo el cálculo hacia adelante se determinan los tiempos próximos de inicio, y hacia atrás se determinan los tiempos remotos de inicio de cada actividad.

La ecuación que se utiliza en el cálculo de los TPI es la siguiente:

$$TPI_j = \max_{\substack{\text{todas } i \\ i}} [TPI_i + d_{ij}] \quad (3.1),$$

donde

TPI: Tiempo próximo de inicio de la actividad sucesora.

j: Nodo que indica el final de la actividad predecesora y el inicio de la actividad sucesora.

i: Nodo que indica el inicio de la actividad predecesora.

d: Duración de la actividad predecesora.

Si tenemos tres actividades A, B y C que confluyen a una cuarta actividad D, esta actividad tendrá un TPI igual al mayor de la suma de los TPI's de las otras actividades con la duración de dichas actividades.

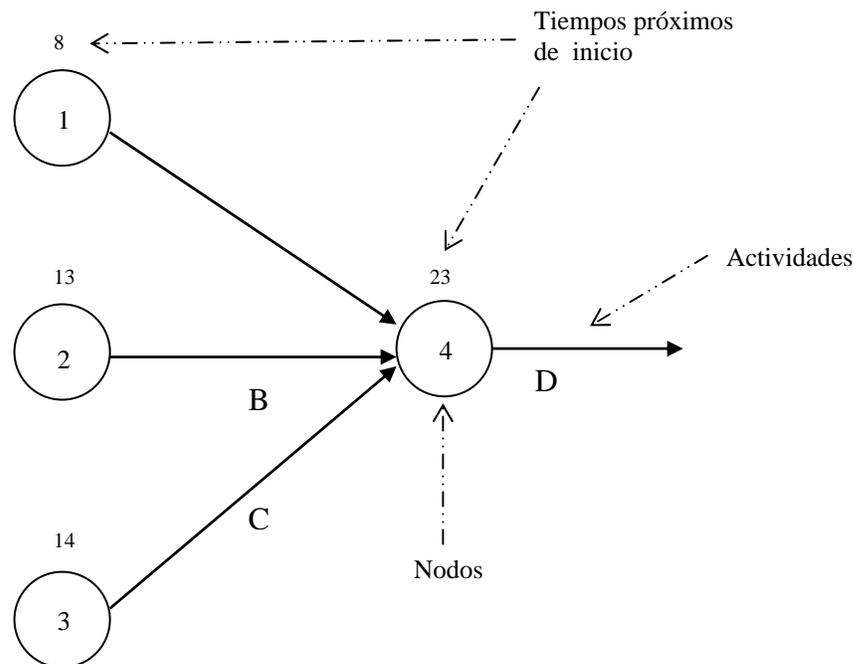


Figura 3.14 Tiempo próximo de inicio (TPI) de la actividad D (Charles Lenzion (2002), Apuntes de Project Management.)

Actividad A: TPI = 8, duración = 7 días

Actividad B: TPI = 13, duración = 10 días

Actividad C: TPI = 14, duración = 5 días

$$TPI_D = [ 8 + 7 = 15, 13 + 10 = 23, 14 + 5 = 19 ]$$

Por lo tanto el TPI de la actividad D será igual a 23, puesto que es el mayor valor de los tres posibles.

Los tiempos próximos de inicio (TPI) de una actividad, es el tiempo próximo de terminación (TPT) de la actividad que la precede. Así en este ejemplo se tiene que el TPI de la actividad D es el tiempo próximo de terminación (TPT) de las actividades A, B y C, estos es igual a 23.

La ecuación que se utiliza para los TRI es la siguiente:

$$TRI_i = \min_{\text{todas } j} [TRI_j - d_{ij}] \quad (3.2)$$

Si tenemos tres actividades B, C y D que provienen de una primer actividad A, ésta actividad tendrá un TRI igual al menor de la resta de los TRI's de las otras actividades con la duración de dichas actividades:

Actividad A: TRI = 21, duración = 12 días

Actividad B: TRI = 23, duración = 5 días

Actividad C: TRI = 25, duración = 15 días

$$TRI_A = [21 - 12 = 9, 23 - 5 = 18, 25 - 15 = 10]$$

por lo tanto el TRI de la actividad A es igual a 9, puesto que es el menor valor de los tres posibles.

Los tiempos remotos de inicio (TRI) de una actividad, es el tiempo remoto de terminación (TRT) de la actividad que la precede. Así en este ejemplo se tiene que el TRI de las actividades B, C y D es el tiempo remoto de terminación (TRT) de la actividad A, esto es igual a 9.

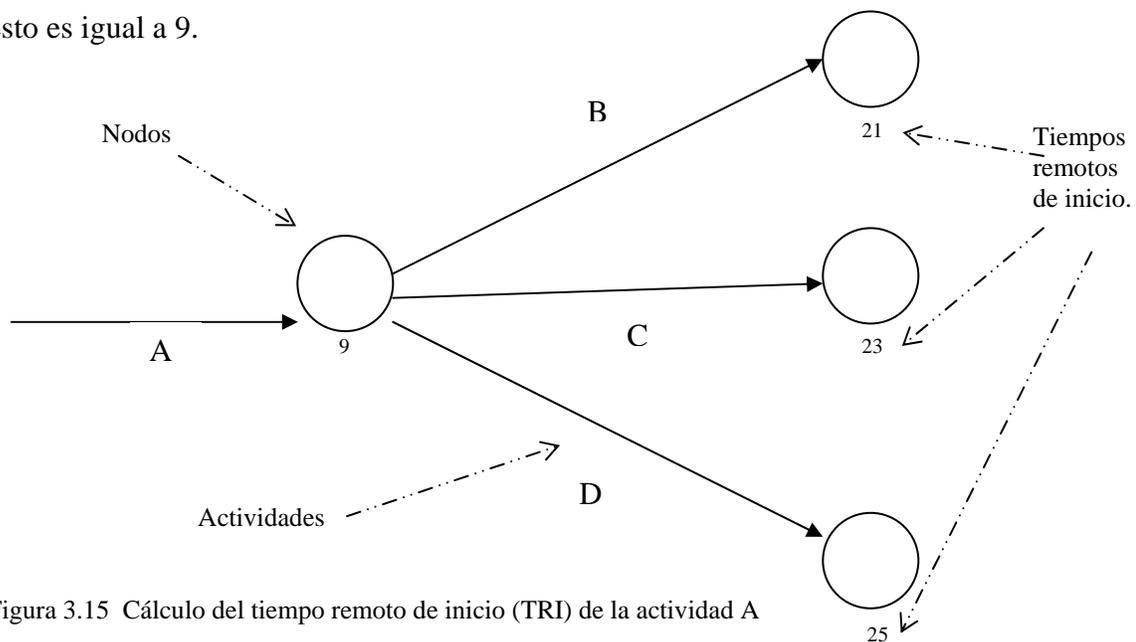


Figura 3.15 Cálculo del tiempo remoto de inicio (TRI) de la actividad A (Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.)

### a.1 Determinación de la ruta crítica

Una vez que se tienen los TPI's, TRI's, y en consecuencia los TPT's y los TRT's de todas las actividades se puede determinar la ruta crítica por medio de los tiempo flotantes, así como la duración total del proyecto que será el TRT de la última actividad. Dentro de los tiempos flotantes existe el flotante total y el flotante libre. El flotante total es la cantidad total de tiempo que una actividad puede retrasarse sin causar ningún retraso en la duración total del proyecto. Este retraso puede afectar a alguna de las actividades que le siguen, pero sin afectar la duración del proyecto. Mientras que el flotante libre es la cantidad de tiempo que una actividad puede retrasarse sin afectar a las actividades que la suceden.

La ecuación para calcular el flotante total es la que sigue:

$$FT_i = TRT_i - (TPI_i + d_i) \quad (3.3),$$

donde

FT: Flotante total de la actividad en estudio.

TRT: Tiempo remoto de terminación.

Se debe tomar en cuenta que los TRT de la actividad en estudio son los TRI de la actividad anterior, como se explicó anteriormente. De esta manera la actividad A, cuya duración es de 5 días, tiene un flotante total de 10 días como se ilustra a continuación:



Figura 3.16 Esquema de una actividad con tiempo próximo de inicio y tiempo remoto de terminación.  
(Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.)

El flotante total es:

$$FT_A = 15 - (0 + 5) = 10$$

Para determinar el flotante libre se tiene:

$$FL_i = TPT_i - (TPI + d_i) \quad (2.4),$$

donde

FL: Flotante libre de la actividad en estudio.

TPT: Tiempo próximo de terminación.

Basándonos en el mismo ejemplo anterior, el flotante libre de la actividad A es igual a 2, como se demuestra a continuación:

$$FL_A = 7 - (0 + 5) = 2$$

Para saber cuál es la ruta crítica basta con encontrar aquellas actividades en las que los TPT y los TRT son iguales. Estos nos arrojaría a la hora de realizar todos los cálculos que el flotante total de cada actividad es igual a cero. El conjunto de actividades críticas nos determinan la ruta crítica del proyecto.

Es importante encontrar esta ruta crítica pues es dónde el gerente de proyectos debe prestar mayor atención. El control en cuanto a tiempo de éstas actividades es determinante, puesto que si se atrasa una de éstas actividades, se retrasa todo el proyecto, lo cual incide en mayores gastos para el contratista.

#### b. Redes de precedencia

En un proyecto puede haber actividades que no necesariamente deben empezar hasta que termine la actividad que le precede, sino que puede empezar mientras que la primera esta todavía en proceso, o hay actividades que pueden realizarse al mismo tiempo.

El método del diagrama de flechas complica bastante este tipo de esquemas, y no permite establecer las relaciones especiales que puede haber entre una actividad y otra.

Para poder resolver estas limitantes se utilizan las redes de precedencia, en donde al contrario de los diagramas de flecha, las actividades se representan en los nodos, y las flechas sirven únicamente para conectar las actividades, así como especificar el tipo de relación entre una y otra. Los nodos son representados con rectángulos, con espacios a la izquierda y a la derecha de ellos para indicar los TPI, TPT, TRI, y TRT para cada actividad.

### b.1 Adelanto y demora de actividades

Una ventaja de esta técnica es que podemos establecer relaciones especiales entre todas las actividades. Las relaciones entre estas actividades se muestran a base de flechas, como se mencionó anteriormente. La red procede de izquierda a derecha, y las relaciones pueden ser inicio-inicio, (inicio de la actividad que sucede después de la que precede); término-término (término de la actividad que sucede después del término de la que precede); término-inicio (inicio de la actividad que sucede después del término de la que precede). Existe también la inicio-término, (término de la que sucede después del inicio de la que precede)<sup>2</sup>.

Este tipo de diagrama es muy explícito puesto que en un red de precedencia las flechas no sólo indican la secuencia de las actividades, sino también indican los tiempos de adelanto y demora para el inicio y término de cada actividad. Todos estos conceptos se explican a continuación.

Cuando la actividad  $i$  precede a la actividad  $j$ <sup>2</sup>:

$TT_{ij}$  = tiempo de demora para una relación término-término. La actividad que sucede concluye esta cantidad de tiempo después de la culminación de la actividad que la precede.

$II_{ij}$  = tiempo de adelanto para una relación inicio-inicio. La actividad que sucede puede comenzar este tiempo después de haber comenzado la actividad que la precede, esto es, que no es necesario que la actividad  $i$  concluya para que la actividad  $j$  pueda comenzar.

---

<sup>2</sup> Ahuja, (1983), Project Management – Techniques in Planning and Controlling Construction Projects, a Wiley Series edition.

$TI_{ij}$  = tiempo de demora para una relación término-inicio. La actividad que sucede empieza esta cantidad de tiempo después de la culminación de la actividad que la precede.

$IT_{ij}$  = tiempo de adelanto para una relación inicio-término. La actividad que precede puede comenzar esta cantidad de tiempo antes de que culmina la actividad que la sucede.

## b.2 Cálculo de los tiempos de actividad y los tiempos flotantes

Dentro de las actividades se tienen los tiempos próximos de inicio (TPI), tiempo próximo de terminación (TPT), tiempo remoto de inicio (TRI), y tiempo remoto de terminación (TRT).<sup>3</sup> También se tiene lo que se conoce como tiempo flotante total y tiempo flotante libre. El tiempo flotante total afecta a toda la red y el libre afecta sólo a las actividades que le siguen a esa actividad. Para calcular estos tiempos en el método de precedencias se consideran las siguientes ecuaciones<sup>4</sup>.

### Término-inicio:

$$TPI_B = TPT_A - \text{tiempo de demora de AB}$$

$$TRT_A = TRI_B - \text{tiempo de demora de AB}$$

$$FT = TRT - TPT$$

$$FL_A = TPI_A - \text{tiempo de demora de AB} - TPT_A$$

### Inicio-inicio:

$$TPI_B = TPI_A + \text{tiempo de avance de AB}$$

$$TRI_A = TRI_B - \text{tiempo de avance de AB}$$

$$FT = TRT - TPT$$

$$FL_A = TPI_B - \text{tiempo de avance} - TPI_A$$

---

<sup>3</sup> Antill & Woodhead (1995), Método de la ruta crítica y sus aplicaciones a la construcción, Editorial Limusa.

<sup>4</sup> Charles Lenzion (2002), Apuntes de Project Management.

Término-término:

$$TPT_B = TPT_A + \text{tiempo de demora de AB}$$

$$TRT_A = TRT_B - \text{tiempo de demora de AB}$$

$$FT = TRT - TPT$$

$$FL_A = TPT_B - \text{tiempo de demora} - TPT_A$$

donde

$FL_A$ : Es el flotante libre de la actividad A.

FT: Es el flotante total de las actividades.

Para calcular estos tiempos se procede de la siguiente manera. Hacia adelante, se calculan los TPI y TPT, de forma similar a como se explicó en el método de la ruta crítica. Es necesario recordar que estos tiempos se calculan tomando los valores máximos calculados de las actividades que preceden a la actividad en estudio.

Hacia atrás se calculan los TRI y TRT, tal como se explicó en el método de la ruta crítica. Aquí, al contrario de cuando es hacia adelante, se toman los valores mínimos de los valores calculados de las actividades que suceden a la actividad en estudio.

Si en una actividad no está restringido el tiempo de inicio y/o el tiempo de terminación por alguna flecha quiere decir que se puede iniciar o terminar en cualquier momento, siempre y cuando se cumplan las condiciones determinadas por las flechas.

De la misma forma que en el Diagrama de flechas, se debe determinar cuál es la ruta crítica, las cuáles serán aquellas que tengan un TPI y un TRI iguales, o su flotante total sea igual a cero. Esto se puede apreciar con mayor claridad en el ejemplo 2.1 de la siguiente sección.

### 3.2.4 PERT (Program Evaluation Review Technique)

Esta técnica ha demostrado ser una herramienta efectiva en el diseño, desarrollo y defensa de proyectos. Tiene ciertas ventajas sobre el Diagrama de flechas y las Redes de precedencia cuando el logro de los objetivos del proyecto es relativamente incierto. Las actividades en una red tipo PERT son expresadas por eventos. Las flechas indican la dirección de la secuencia de las operaciones, y el tiempo para realizar el evento que le sucede. PERT permite un cálculo probabilístico de la duración de las actividades implementando tres posibles duraciones<sup>5</sup>.

Estas tres posibles duraciones son la duración óptima, la duración media, y la duración pesimista de cada actividad. Estas duraciones son duraciones probables, en base a los registros de proyectos similares realizados con anterioridad, de los que se tienen distintas tiempos de duración dependiendo de si las circunstancias fueron favorables o no. Para elaborar la red se toma la media de estos tres valores utilizando la fórmula siguiente:

$$t_e = \frac{d_o + 4d_m + d_p}{6} \quad (3.5),$$

donde

$d_o$ : Duración óptima.

$d_m$ : Duración media.

$d_p$ : Duración pesimista.

dónde  $t_e$  será la duración media calculada de cada actividad, la cual se usará para la elaboración de la red. El cálculo de los TPI, TPT, TRI y TRT se calculan de la misma forma que en la ruta crítica.

Esta técnica nos permite calcular la probabilidad de que se concluya el proyecto en el tiempo estimado por el cliente. Es decir, si el cliente estimó que se puede concluir el proyecto "X" en un total de seis semanas, el contratista puede calcular la probabilidad de que ese proyecto en efecto esté terminado en ese periodo de seis semanas.

---

<sup>5</sup> Ahuja, (1983), Project Management – Techniques in Planning and Controlling Construction Projects, a Wiley Series edition.

Para poder realizar dicho cálculo probabilístico se hace uso de la varianza total del proyecto. La varianza total del proyecto será la suma de las varianzas de las actividades pertenecientes a la ruta crítica.

Para el cálculo de la varianza se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{varianza} = ((d_p - d_o)/6)^2 \quad (3.6)$$

Si se quiere calcular la probabilidad de que se pueda terminar el proyecto en el tiempo estimado se utiliza la desviación estándar del proyecto, (la cual es la raíz de la varianza total del proyecto), y las tablas de distribución normal estándar.

$$Z = \frac{\text{duración estimada} - \text{duración calculada}}{\text{desviación estándar}} \quad (3.7)$$

Donde Z es un valor numérico que nos indica, con ayuda de las tablas de distribución normal, la probabilidad de que el proyecto se termine en la duración estimada. Todo el manejo del PERT puede comprenderse mejor con el siguiente ejemplo.

*Ejemplo 3.1* Elaborar un análisis PERT y encontrar la probabilidad de que el proyecto concluya en un período entre 17 y 20 días.

Tabla 3.2 Análisis PERT.

Actividad	Predecesores	Duraciones probables (d <sub>o</sub> , d <sub>m</sub> , d <sub>p</sub> )
1	-----	1,4,5
2	-----	2,3,4
3	1	6,10,13
4	1	6,6,7
5	2	2,2,2
6	3	1,2,3
7	4,5	5,8,9
8	2	12,16,19

Fuente: Charles Lendzion (2002), Apuntes de Project Management.

El cálculo de la media y la varianza es el siguiente:

Tabla 3.3 Análisis PERT.

Actividad	D <sub>opt</sub>	D <sub>media</sub>	D <sub>pes</sub>	Media	Varianza
1	1	4	5	3.7	0.4
2	2	3	4	3.0	0.1
3	6	10	13	9.8	1.4
4	6	6	7	6.2	0.0
5	2	2	2	2.0	0.0
6	1	2	3	2.0	0.1
7	5	8	9	7.7	0.4
8	12	16	19	15.8	1.4

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a estos valores podemos elaborar la red como sigue:

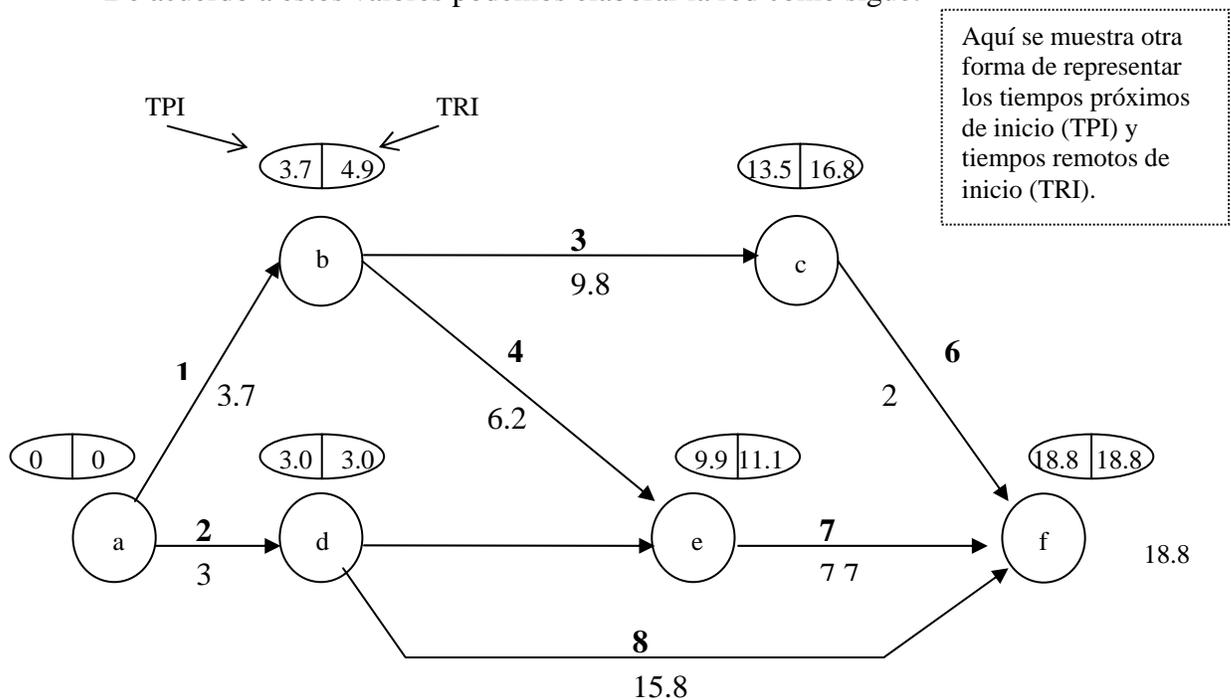


Figura 3.17 Ruta crítica en base a un análisis PERT. (Elaboración propia.)

Al observar la red puede apreciarse claramente que las actividades en las que el TPI = TRI son las actividades 2 y 8. Por lo tanto la ruta crítica estará determinada por dichas actividades, y la varianza total del proyecto será la suma de la varianza de dichas actividades. Así, se tiene que la varianza total del proyecto es de  $0.1 + 1.4 = 1.5$ .

La desviación estándar del proyecto será entonces la raíz de 1.5, lo cual da un valor aproximado de 1.2247. Aplicando la fórmula para calcular Z expresada arriba, se puede determinar la probabilidad para que el proyecto concluya entre 17 y 20 días. El valor de Z para el tiempo estimado de 20 días es igual a  $.979797 \simeq .98$ , y yendo a la tabla de distribución normal estándar se tiene una probabilidad de 83.7%. Para el tiempo estimado de 17 días se tiene un valor de Z igual a  $-1.4696 \simeq -1.47$ , y yendo nuevamente a la tabla de distribución normal se tiene un valor de Z igual a 7.1%. Por lo tanto, la probabilidad de completar el proyecto entre 17 y 20 días será:  $83.7 - 7.1 = 76.6\%$ .

Con esto se concluye de que existe un 76.6% de probabilidad de que el proyecto en cuestión esté completado en el tiempo estimado por el cliente, que es de entre 17 y 20 días.

### 3.3 Flujo de efectivo del proyecto

Haciendo uso del diagrama de barras elaborado por el proyectista, es posible calcular el flujo de efectivo del proyecto a través del tiempo. Supóngase como ejemplo un proyecto simplificado a 5 actividades. La actividad A se realiza en dos meses, la B en uno y medio, la C en dos y medio, la D en tres meses y por último la E en un mes. Esto se ilustra en el siguiente ejemplo.

*Ejemplo 3.2* En la figura 3.18 se muestra el diagrama de barras para un proyecto de cinco actividades, y una duración estimada de cuatro meses. Sobre cada actividad se coloca su respectivo costo total propuesto, como costo directo. Se calculan proporcionalmente los costos directos de las actividades por mes, y se le suman los costos indirectos estimados. Así, para el segundo mes la actividad A ya ha sido completada, por lo que los costos directos de ese mes serán los correspondientes a las actividades B, C y D, de la siguiente forma:

$$\text{Actividad B: } 1/2 \times \$15,000 = \$ 7,500$$

$$\text{Actividad C: } 2/3 \times \$30,000 = \$20,000$$

$$\text{Actividad D: } 1/4 \times \$70,000 = \underline{\$17,500}$$

$$\$45,000$$

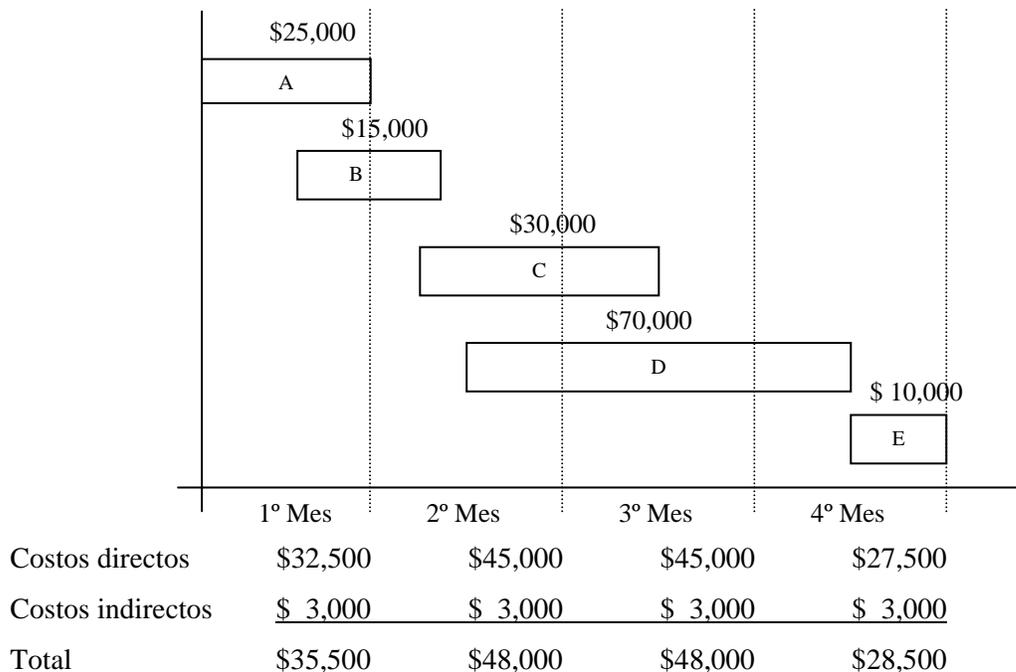


Figura 3.18 Cálculo de los costos totales o egresos del proyecto. (Elaboración propia.)

Con estos valores es posible generar una curva de costos en función del tiempo, lo que representa los egresos de dicho proyecto. Dicha curva se muestra en la figura 3.19.

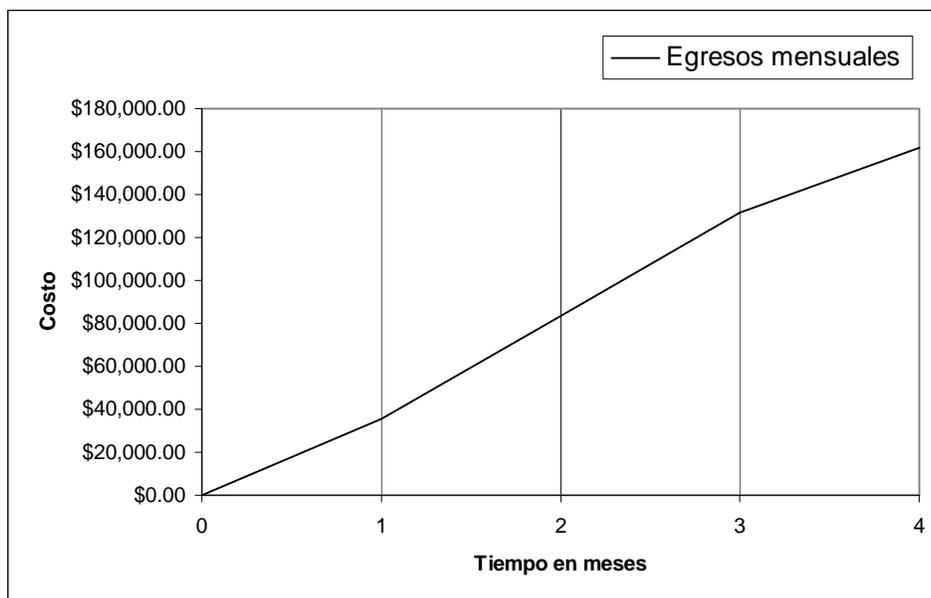


Figura 3.19 Curva acumulada de los egresos del proyecto en cuestión. (Elaboración propia.)

Adicionalmente a esto, es posible calcular los ingresos obtenidos del proyecto conforme a lo acordado en el contrato. Supóngase que se tiene un porcentaje de ganancia

del 22%, y que el dueño en el contrato especifica que se retendrá un 10% del pago en garantía durante la primera mitad del proyecto. Este 10% será aumentado al pago final hecho al contratista, una vez finalizado por completo el proyecto. Los pagos son realizados al final de cada mes, y el primer pago se efectúa 30 días después de la fecha de facturación. De acuerdo a esta información es posible elaborar la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Análisis de flujo de efectivo.

Meses	Costos	Facturado	Retención	Pago
1	\$35,500	\$43,310	\$4,331	\$38,979
2	\$48,000	\$58,560	\$5,856	\$52,704
3	\$48,000	\$58,560		\$58,560
4	\$30,500	\$37,210		\$47,397
	\$162,000	\$197,640	\$10,187	\$197,640

Fuente: Elaboración propia.

Donde lo facturado se obtiene multiplicando el costo directo por el porcentaje de ganancia, 22% para este caso, quedando como sigue:  $\$35,500(1.22) = \$43,310$ . Para la retención se retiene el 10% de lo facturado, por lo tanto será  $\$43,331(0.1) = \$4,331$ . Por último el pago a realizar en el caso del primer mes será lo facturado – la retención, esto es:  $\$43,310 - \$4,331 = \$38,979$ . Con estos valores es posible generar la gráfica mostrada en la figura 3.20, que representa la entrada de dinero hacia el contratista. Tiene una forma escalonada debido a que los pagos no son constantes, sino que se realizan cada cierto tiempo.

Existen casos en los que se tienen proyectos grandes, para los cuales el contratista requiere de financiamiento externo para cubrir los primeros gastos de la obra antes de recibir cualquier pago. En estos casos se puede hacer un flujo de efectivo similar, con la diferencia de que en éste se incluya el pago de ese financiamiento externo.

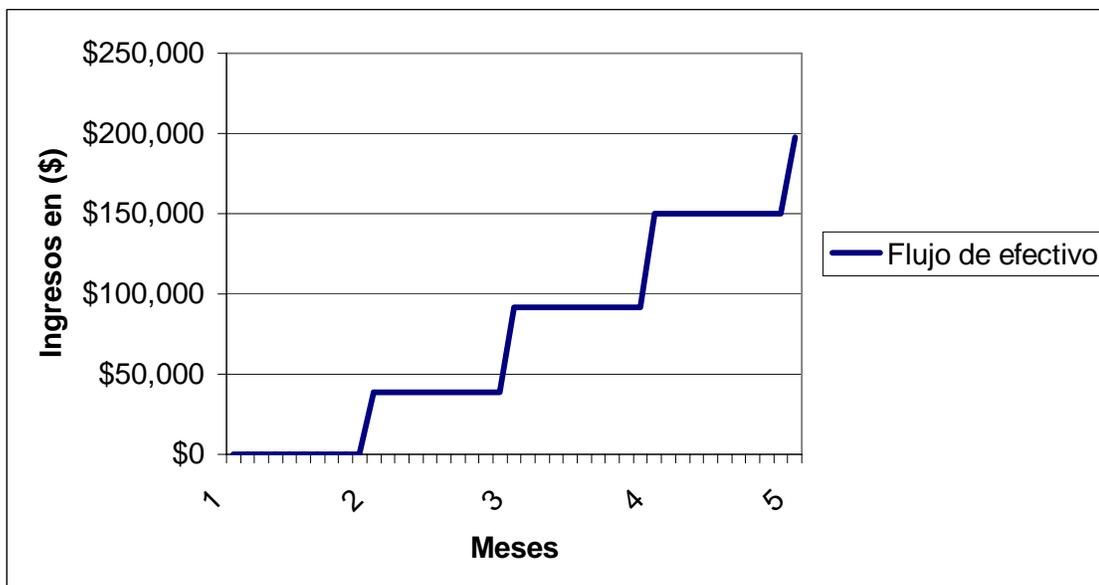


Figura 3.20 Esquema de las entradas de efectivo (pagos recibidos) del contratista. (Elaboración propia.)

Esto se puede ilustrar continuando con el ejemplo 2.2. Supóngase que todos los costos tanto directos como indirectos se obtienen de un financiamiento externo, de esta manera el flujo de efectivo se genera como sigue:

Tabla 3.5 Análisis de flujo de efectivo con financiamiento externo.

Concepto	Meses							
	1	2	3	4				
Costo directo	32,500	45,000	45,000	27,500				
Costo indirecto	3000	3000	3000	3000				
Subtotal	35,500	48,000	48,000	30,500				
Utilidad	7810	10560	10560	6710				
Total facturado	43,310	58,560	58,560	37,210				
Retención	4331	5856						
Pago recibido			38,979	52,704	58,560	47,397		
Costo total a la fecha	35,500	83,500	131,500	162,000	162,000			
Total facturado a la fecha	43,310	101,870	160,430	197,640	197,640			
Pago total a la fecha			38,979	91,683	150,243	197,640		
Financiamiento al final del mes	35,500	83,855	93,715	72,448	14,612	-32,785		
Interés del financiamiento	355	838.55	937.15	724.477				
Cantidad total financiada	35,855	84,694	94,652	73,172	14,612	-32,785*		

Fuente: Ideado a partir del libro "Construction Management", por Halpin and Woodhead, 1998. pág. 123.

\*El recuadro en gris indica la ganancia del constructor. El signo negativo indica que el constructor tiene saldo a favor, puesto que ha terminado de pagar el financiamiento.

### 3.3.1 Costeabilidad de un proyecto

En el caso de la industria de la construcción, es necesario analizar la costeabilidad de un proyecto, sobre todo en el caso de proyectos grandes, de esta manera se generan registros históricos de los proyectos realizados y se puede determinar en un futuro si conviene o no volver a realizar cierto tipo de proyecto. El esquema de pagos especificado en el contrato influye mucho en dicha costeabilidad. A ningún contratista le conviene comenzar la obra con recursos propios, y tampoco tener un financiamiento externo, dado que si el cliente decide dejar a medias el proyecto, o en el caso del gobierno que termina su período y no paga, esa deuda podría llevar a la quiebra. Es por eso que se puede hacer un análisis de las formas más convenientes pago para un proyecto, de tal manera que el contratista tenga una recuperación de efectivo aceptable.

Una forma de realizar este análisis es aplicando uno de los criterios para la evaluación de proyectos de inversión conocido como *tasa interna de retorno*, o *tasa interna de rendimiento (TIR)*. Conociendo la TIR de diferentes esquemas de pago es posible escoger el más conveniente para el contratista. Para calcular la TIR es posible aplicar la siguiente fórmula:

$$0 = \sum_{j=1}^n \frac{(\text{entradas} - \text{salidas})_j}{(1+r)^j} \quad (3.8)$$

en donde

$r$  : la tasa interna de rendimiento expresado en valor porcentual.

$j$  : el número de año o mes.

$n$ : el número total de años o meses a considerar.

Este valor de  $r$  se puede calcular mediante el procedimiento de prueba y error, aunque puede calcularse muy fácilmente con la ayuda de Excel o con la ayuda de calculadoras financieras.

La TIR está íntimamente relacionada con el valor presente, (VP). La tasa de retorno calculada por TIR es la tasa de interés correspondiente a un valor presente 0 (cero).

Es posible calcular la TIR manualmente haciendo uso de tablas de factor valor presente a diferentes tasas de interés, donde estos valores fueron obtenidos con la siguiente fórmula:

$$VP = \frac{1}{(1 + i)^n}$$

en donde  $i$  es la tasa de interés y  $n$  es el número de mes o año para el cual se esté calculando el factor. A continuación se ilustra el cálculo de la misma, partiendo de los datos del ejemplo 3.2.

$$0 = \frac{(-35,855)}{(1 + r)^1} + \frac{(38,979 - 48,839)}{(1 + r)^2} + \frac{(52,704 - 48,937.15)}{(1 + r)^3} + \frac{(58,560 - 31,224)}{(1 + r)^4} + \frac{(47,397)}{(1 + r)^5}$$

Los valores en rojo representan los egresos realizados por parte del constructor, y son la suma de los costos totales + el interés por financiamiento de cada mes mostrados en la tabla 3.4. Los valores en negro son los ingresos recibidos por el constructor un mes después de facturados, mostrados también en la tabla 3.4.

Usando Excel encontramos que  $r = 17.66\%$ , lo que representa la TIR = 17.66%

Se puede observar que esta TIR es un poco baja, dado que el contratista está financiando en forma externa los costos de la obra. Si por el contrario se tiene un esquema de pago diferente, en el que el contratista recibe un pago por adelantado de \$20,000 al término del primer mes, a partir del cual le suceden los demás pagos en forma periódica, (ver cifras en color azul), se tiene una TIR mucho mayor.

Esto se puede observar más claramente a continuación:

Tabla 3.6 Análisis de flujo de efectivo con financiamiento externo.

Costo directo	32,500		45,000		45,000		27,500			
Costo indirecto	3000		3000		3000		3000			
Subtotal	35,500		48,000		48,000		30,500			
Utilidad	7810		10560		10560		6710			
Total facturado	43,310		58,560		58,560		37,210			
Retención	4331		5856							
Pago recibido		20,000		38,979		52,704		58,560		27,397
Costo total a la fecha	35,500		63,500		131,500		162,000		162,000	
Total facturado a la fecha	43,310		101,870		160,430		197,640		197,640	
Pago total a la fecha				38,979		91,683		150,243		177,640
Financiamiento al final del mes	35,500		63,855		73,515		52,046		-5,994	-33,391
Interés del financiamiento	355		638.55		735.15		520.46			
Cantidad total financiada	35,855		64,494		74,250		52,566		-5,994	-33,391

Fuente: Ideado a partir del libro "Construction Management", John Wiley & Sons, Inc. 1998. pág. 128.

En este caso la TIR calculada nos da lo siguiente:

$$0 = \frac{(20,000 - 35,855)}{(1+r)^1} + \frac{(38,979 - 48,839)}{(1+r)^2} + \frac{(52,704 - 48,937.15)}{(1+r)^3} + \frac{(58,560 - 31,224)}{(1+r)^4} + \frac{(27,397)}{(1+r)^5}$$

$$\text{TIR} = \underline{32.20\%}$$

Con todo esto se puede concluir que para el contratista es mucho más costoso realizar la obra bajo el segundo esquema puesto que aumenta su ganancia neta, pero sobre todo porque es poca la cantidad de dinero que el contratista necesita financiar por su cuenta o en forma externa, reduciendo así el peligro de endeudamiento.