

## ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS CON EXCEL USANDO PERT/CPM

*Carlos E. Azofeifa Zamora*

Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,  
Universidad Nacional, Heredia 86-3000, Costa Rica y Escuela de  
Matemática, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

### ABSTRACT

The PERT/CPM technique, used in the administrative science, helps to prove and control the tasks that are interrelated by means the resolution of the project benefits of the technique applied. Also PERT/Costs technique is used to check the project's cost.

**Key words:** Project management, costs, evaluation technique and programs revision (PERT), method of the critical route (CPM), uncertainty.

### RESUMEN

Se presenta la técnica PERT/CPM de la ciencia administrativa, que ayuda a comprobar y controlar aquellos proyectos que involucran muchas tareas interrelacionadas, mediante la resolución de un problema de la administración de proyectos con la ayuda de la hoja electrónica Excel, además, se realiza un análisis de sus beneficios. También se aplica la técnica PERT/Costos en el control de los costos del proyecto, Nassir Sapag Chain (2001) es una guía especial en este tema.

### INTRODUCCIÓN

Cuando un administrador de un gran proyecto debe planear, programar y controlar un considerable número de actividades en toda la administración, le es difícil recordar toda la información correspondiente al plan, programa y avance del proyecto. Para estas situaciones se dispone de dos técnicas de la investigación de operaciones con una relación muy cercana: la técnica de evaluación y

revisión de programas (PERT) y el método de la ruta crítica (CPM); estas técnicas ayudarán al administrador de proyectos a llevar a cabo estas responsabilidades.

Las técnicas PERT y CPM se desarrollaron de manera independiente al final de la década de los años 50; desde ese tiempo, han estado entre las técnicas de investigación de operaciones con más uso. PERT fue desarrollada por la Marina de los EE. UU. para el proyecto del misil Polaris, particularmente en el manejo de tiempos inciertos de la mayoría de las actividades. CPM, en cambio, se desarrolló para proyectos industriales, de los que generalmente se desconocían los tiempos de actividad. Kelly de Remington y M. Walker de Dupont Company crearon en 1957 esta técnica. CPM ofrecía la opción de reducir los tiempos de actividad mediante el aporte de más trabajadores o recursos a un costo más alto. Las versiones originales de estas técnicas tenían algunas diferencias importantes, sin embargo, tienen mucho en común y con el paso de los años se han fusionado de modo gradual, de manera que las actuales versiones por computadora combinan las mejores características de ambos procedimientos como PERT/CPM.

Estas técnicas se han utilizado en una gran variedad de proyectos, entre los que se pueden mencionar: investigación y desarrollo de productos nuevos y procesos; producción de películas; construcción de plantas, carreteras y edificios; instalación de sistemas de información administrativos; diseño de embarcaciones marítimas; campañas publicitarias; mantenimiento de equipo grande y complejo, diseño e instalación de sistemas nuevos, entre otros.

La potencia de las computadoras personales recientemente ha hecho posible que el administrador de proyectos use hojas de cálculo para evaluar el riesgo de inversiones financieras, evaluación de proyectos, planes de retiro y otros tipos de decisiones de negocios. Lo anterior se debe a la flexibilidad y capacidad estadística de la hoja de cálculo, la cual la hace especial también para el desarrollo de los modelos de simulación, particularmente en el uso de la simulación Monte Carlo, que se aplica a la técnica de la ruta crítica; obras excelentes al respecto son las de los autores Evans y Olson (2002), Azarang y García (1996).

El objetivo de este trabajo fue implementar la aplicación de la técnica de evaluación y revisión de programas y el método de la ruta crítica, es decir, PERT/CPM, utilizando la hoja electrónica Excel, mediante un problema aplicado.

**PROCEDIMIENTO**

El problema aplicado fue extraído de Hillier y Lieberman (2000) (Cap. 10, p. 523) que dice: P-H Microship Co. debe emprender un programa de mantenimiento y renovación para reparar y modernizar sus instalaciones para la fabricación de tabletas. Este proyecto incluye seis actividades (A, B, C, D, E, F) con las relaciones de precedencia mostradas en la siguiente red.

Se establecen la duración y los costos estimados de las actividades (Cuadro 1).

**Preguntas a resolver**

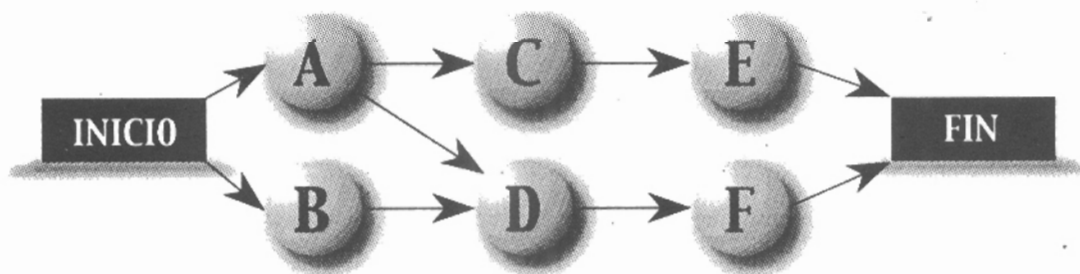
- a. Encuentre los tiempos más cercanos, más lejanos y la holgura de cada actividad. ¿Cuál es el tiempo de terminación más cercano del proyecto?

**Cuadro 1**  
**Duración y costos de las actividades**

Actividad	Duración (Semanas)	Costo (\$)
A	6	420,000
B	2	180,000
C	4	540,000
D	5	360,000
E	7	590,000
F	9	630,000

- b. Use Excel para desplegar el presupuesto y el programa de costos basados en los tiempos de inicio más cercanos para el proyecto en una sola hoja de cálculo.
- c. Repita el inciso anterior pero con base en los tiempos de inicio más lejanos.
- d. Use Excel para mostrar una figura con los costos acumulados del proyecto cuando todas las actividades inician en sus tiempos más cercanos o en los más lejanos.
- e. Después de cuatro semanas, la actividad B terminó (con un costo real de \$200,000), la actividad A lleva el 50% (con un costo real hasta la fecha de \$200,000) y la actividad D lleva el 50% (con un costo real hasta la fecha de \$210,000). Elabore un informe PERT/Costos después de cuatro semanas. ¿Dónde debe centrar su atención el director del proyecto para mejorar el desempeño en costos?

En el Cuadro 2 se puede observar todas las trayectorias y sus respectivas longitudes a través de la red de proyecto.



**Cuadro 2**  
**Trayectorias y sus respectivas longitudes**

Trayectoria	Longitud
Inicio→A→C→E→Finalización	$6+4+7= 17$ semanas
Inicio→A→D→F→Finalización	$6+5+9= 20$ semanas
Inicio→B→D→F→Finalización	$2+5+9= 16$ semanas

Se sabe que la duración del proyecto no será mayor que una trayectoria en particular, es decir, la duración estimada del proyecto es igual a la longitud de la ruta más larga, esta trayectoria más larga se llama la ruta crítica. En este caso para el proyecto P-H Microship Co.:

Ruta crítica: Inicio→A→D→F→Finalización.  
Duración estimada del proyecto: 20 semanas.

En caso de tener redes pequeñas de proyectos, este método de encontrar todas las rutas y determinar la ruta más larga es una manera bastante natural y cómoda para encontrar la ruta crítica, sin embargo, para proyectos grandes este procedimiento no es eficiente. Para estos casos PERT/CPM utiliza un procedimiento más eficiente.

## PROGRAMANDO ACTIVIDADES INDIVIDUALES

Recuerde que el tiempo de inicio más inmediato es el tiempo más cercano en que una tarea posiblemente puede iniciarse, y el tiempo de terminación más breve es el tiempo más corto en el que una tarea posiblemente puede concluir. La regla para el tiempo de inicio más cercano de una actividad es igual al mayor de los tiempos de terminación más cercanos de sus predecesores inmediatos.

De manera similar, el tiempo de terminación más lejano es lo más tarde que pueda concluirse una actividad, en tanto que permita que el proyecto se complete lo más pronto posible, y el tiempo de inicio más lejano es lo más tarde que pueda iniciarse una tarea, pero finalizando dentro de su último tiempo de terminación. La regla para el tiempo de terminación más lejano de una actividad es igual al menor de los tiempos de inicio más lejanos de sus sucesores inmediatos.

## Notación

TIC= tiempo de inicio más cercano para una tarea asignada.

TTC= tiempo de terminación más cercano para una tarea asignada.

Estos tiempos se relacionan mediante la ecuación:

$TTC = TIC +$  duración estimada de la tarea.

TIL= tiempo de inicio más lejano para una tarea asignada.

TTL= tiempo de terminación más lejano para una tarea asignada.

Estos tiempos están relacionados mediante la ecuación:

$TIL = TTL -$  duración estimada de la tarea.

Algunas reglas para obtener el TIC o el TIL son:

- Si una actividad solamente tiene un predecesor inmediato, entonces, se tiene que el TIC para una tarea es igual al TTC para el predecesor inmediato.
- Para el caso en que una actividad tiene más de un predecesor se debe cumplir: el tiempo de inicio más cercano de una tarea es igual al mayor de los tiempos de terminación más cercanos de sus predecesores inmediatos. Aquí se comienza con las actividades iniciales y se trabaja hacia delante en el tiempo hasta las actividades finales para el cálculo de los TIC y TTC.
- El tiempo de terminación más lejano de una tarea es igual al menor de los tiempos de inicio más lejanos de sus sucesores inmediatos. Para los cálculos de los TIL y TTL se comienza con las últimas actividades hacia atrás en el tiempo hacia las actividades iniciales.

Para el cálculo del TIC se cuenta el número de periodos (semanas) desde el momento en que el proyecto comienza, en efecto, para las distintas actividades:

**Cuadro 5**  
**Modelo para PERT/Costos**

Actividad	Duración estimada semanal	Costos estimados	Tiempo comienzo	Costo semanal de su duración	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
A	6	\$420000	0	\$70000	70000	70000	70000	70000
B	2	\$180000	0	\$90000	90000	90000	0	0
C	4	\$540000	6	\$135000	0	0	0	0
D	5	\$360000	6	\$72000	0	0	0	0
E	7	\$590000	10	\$84286	0	0	0	0
F	9	\$630000	11	\$70000	0	0	0	0
Costo semanal del proyecto					160000	160000	70000	70000
Costo acumulado del proyecto					160000	320000	390000	460000

**Cuadro 6**

Semana 15	Semana 16	Semana 17	Semana 18	Semana 19	Semana 20
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
84285.7	84285.7	84285.7	0	0	0
70000	70000	70000	70000	70000	70000
154286	154286	154286	70000	70000	70000
2201429	2355714	2510000	2580000	2650000	2720000

**Cuadro 7**  
**Modelo para PERT/Costos**

Actividad	Duración estimada semanal	Costos estimados	Tiempo comienzo	Costo semanal de su duración	Semana 1
A	6	420000	0	=D6/C6	=SI(Y(G\$5>\$E6,G\$5<=\$E6+\$C6),\$F6,0)
B	2	180000	4	=D7/C7	=SI(Y(G\$5>\$E7,G\$5<=\$E7+\$C7),\$F7,0)
C	4	540000	9	=D8/C8	=SI(Y(G\$5>\$E8,G\$5<=\$E8+\$C8),\$F8,0)
D	5	360000	6	=D9/C9	=SI(Y(G\$5>\$E9,G\$5<=\$E9+\$C9),\$F9,0)
E	7	590000	13	=D10/C10	=SI(Y(G\$5>\$E10,G\$5<=\$E10+\$C10),\$F10,0)
F	9	630000	11	=D11/C11	=SI(Y(G\$5>\$E11,G\$5<=\$E11+\$C11),\$F11,0)
Costo semanal del proyecto					=SUMA(G6:G11)
Costo acumulado del proyecto					=G14

**Cuadro 8**  
**Fórmulas para los cálculos**

Semana 19	Semana 20
=SI(Y(Y\$5>\$E6,Y\$5<=\$E6+\$C6),\$F6,0)	=SI(Y(Z\$5>\$E6,Z\$5<=\$E6+\$C6),\$F6,0)
=SI(Y(Y\$5>\$E7,Y\$5<=\$E7+\$C7),\$F7,0)	=SI(Y(Z\$5>\$E7,Z\$5<=\$E7+\$C7),\$F7,0)
=SI(Y(Y\$5>\$E8,Y\$5<=\$E8+\$C8),\$F8,0)	=SI(Y(Z\$5>\$E8,Z\$5<=\$E8+\$C8),\$F8,0)
=SI(Y(Y\$5>\$E9,Y\$5<=\$E9+\$C9),\$F9,0)	=SI(Y(Z\$5>\$E9,Z\$5<=\$E9+\$C9),\$F9,0)
=SI(Y(Y\$5>\$E10,Y\$5<=\$E10+\$C10),\$F10,0)	=SI(Y(Z\$5>\$E10,Z\$5<=\$E10+\$C10),\$F10,0)
=SI(Y(Y\$5>\$E11,Y\$5<=\$E11+\$C11),\$F11,0)	=SI(Y(Z\$5>\$E11,Z\$5<=\$E11+\$C11),\$F11,0)
=SUMA(Y6:Y11) =X15+Y14	=SUMA(Z6:Z11) =Y15+Z14

en los tiempos de inicio más cercanos (Cuadros 5 y 6). Se puede también elaborar plantillas personales.

Ahora, para el caso en que el presupuesto y el programa de costos se basan en los tiempos de inicio más lejanos se usan las hojas de cálculo que detallan los Cuadros 7 y 8.

El uso de la plantilla anterior proporciona el costo total del proyecto, para este caso el costo del proyecto da igual al obtenido cuando las actividades inician en sus tiempos más cercanos.

Por tanto, el programa de costos acumulados del proyecto se puede observar en la hoja electrónica Excel, cuando todas las actividades inician en sus tiempos más cercanos o en los tiempos más lejanos. PERT/Costos proporciona los costos totales del proyecto.

La Figura 1 se confeccionó para comparar los costos acumulados del proyecto, cuando todas las actividades inician en sus tiempos más cercanos o en los más lejanos.

Se puede observar en esta figura generada por Excel, el programa de costos acumulados del proyecto, cuando todas las actividades inician en sus tiempos más cercanos o en los tiempos más lejanos. La región encerrada por las curvas se llama región factible para el costo del proyecto. Esta figura sirve para supervisar los costos, comparando los costos reales hasta la fecha con el presupuesto proporcionado por la curva superior de la figura. Pero como pueden ocurrir desviaciones del programa de trabajo planeado, este método para supervi-

sar resulta inadecuado, por eso PERT/Costos debe generar informes periódicos centrados en el desempeño del costo de cada actividad.

En el Cuadro 9 se presenta el informe de PERT/Costos después de cuatro semanas, con el fin de que el gerente del proyecto analice en qué actividad debe centrar su atención para mejorar el desempeño en costos.

Del informe anterior se puede deducir que el gerente debe centrar su atención en la actividad D, pues esta no ha terminado todavía y, además, su costo real ha superado su presupuesto proyectado.

### **Incertidumbre en las duraciones de las actividades**

Al darse las incertidumbres en el estimado preciso de las duraciones de las actividades del proyecto se tiene que hacer la siguiente pregunta natural: ¿Cuál es la probabilidad de terminar el proyecto a tiempo? En la práctica resulta que la duración de cada actividad se convierte en una variable aleatoria con alguna distribución de probabilidad.

Como ya sabemos, PERT tomó en cuenta esta incertidumbre haciendo el cálculo de tres estimaciones para la duración de cada actividad:

- Una estimación más probable (m).
- Una estimación pesimista (p).
- Una estimación optimista (o).

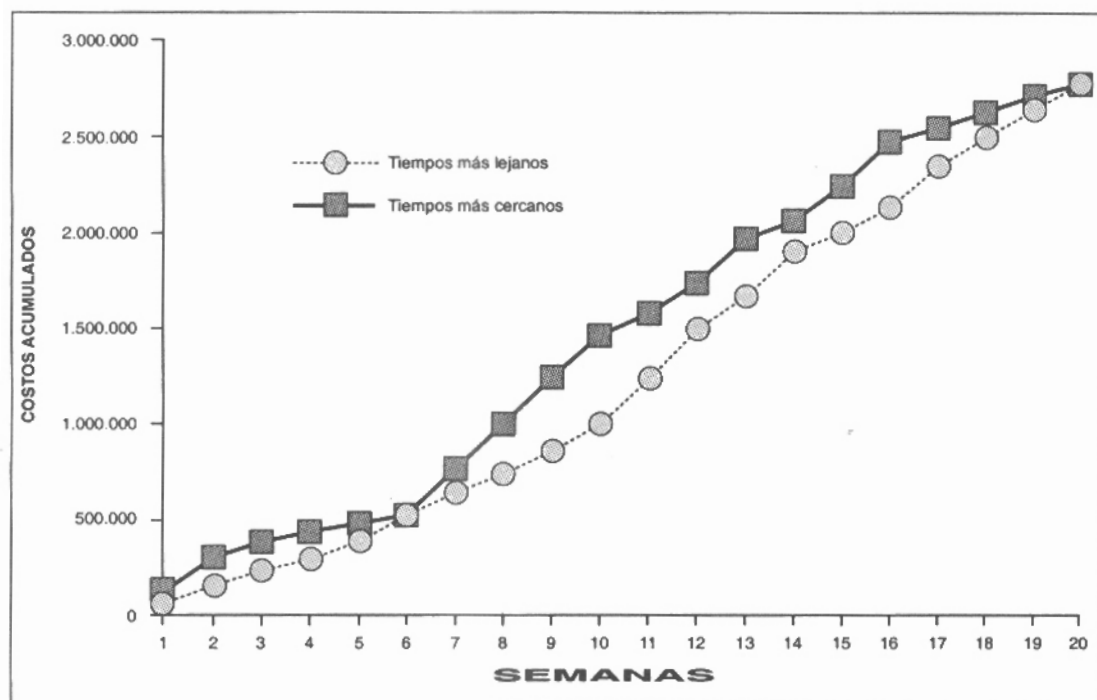


Figura 1. Comparación de los costos acumulados del proyecto.

### Cuadro 9

#### Informe PERT/Costos después de cuatro semanas para P-H Microship Co.

Actividad	Costo presupuestario	Porcentaje terminado	Valor completado	Costo real hasta la fecha	Excedente de costo hasta la fecha
A	\$420000	50	\$210000	\$200000	\$10000
B	\$180000	100	\$180000	\$200000	\$20000
D	\$360000	50	\$180000	\$210000	\$30000
Total	\$960000		\$570000	\$610000	\$40000

La estimación más probable estará en el punto más alto de la distribución de probabilidad y las otras dos en los extremos. PERT supone que la forma de la distribución de probabilidad es una distribución beta, suponiendo los siguientes estimados y usando la plantilla de Excel, por lo que los Cuadros 10, 11 y 12 proporcionan la información necesaria.

La fórmula aproximada para  $\mu$  de una distribución beta es:

$$\mu = \frac{o + 4m + p}{6}$$

De la misma manera, una fórmula aproximada para la varianza es dada por:

$$\sigma^2 = \left( \frac{(p-o)}{6} \right)^2$$

**Cuadro 10**  
**Plantilla para PERT con tres estimaciones**

Actividad	Tiempos estimados			$\mu$	$\sigma^2$	Sobre la ruta crítica media	Ruta crítica media	
	o	m	p					
A	6	7	8	7	0.11111	*	$\mu =$	32.8333
B	1	2.5	5	2.6667	0.44444	*	$\sigma^2 =$	9.69444
C	2	4.5	10	5	1.77778	*		
D	3	5.5	8	5.5	0.69444		$P(T \leq d) =$	0.00228
E	4	7.5	15	8.1667	3.36111	*	donde	
F	5	9.5	17	10	4	*	d =	24

**Cuadro 11**  
**Plantilla con las fórmulas para PERT con tres estimaciones**

Actividad	Tiempos estimados			$\mu$	$\sigma^2$	Sobre la ruta crítica media
	o	m	p			
A	6	7	8	=SI(C6="","", (C6+4*D6+E6)/6)	=SI(C6="","", ((E6-C6)/6)^2)	*
B	1	2.5	5	=SI(C7="","", (C7+4*D7+E7)/6)	=SI(C7="","", ((E7-C7)/6)^2)	*
C	2	4.5	10	=SI(C8="","", (C8+4*D8+E8)/6)	=SI(C8="","", ((E8-C8)/6)^2)	*
D	3	5.5	8	=SI(C9="","", (C9+4*D9+E9)/6)	=SI(C9="","", ((E9-C9)/6)^2)	*
E	4	7.5	15	=SI(C10="","", (C10+4*D10+E10)/6)	=SI(C10="","", ((E10-C10)/6)^2)	*
F	5	9.5	17	=SI(C11="","", (C11+4*D11+E11)/6)	=SI(C11="","", ((E11-C11)/6)^2)	*

**Cuadro 12**

$\mu =$	=SUMAR.SI(H6:H11,"*",F6:F11)
$\sigma^2 =$	=SUMAR.SI(H6:H11,"*",G6:G11)
$P(T \leq d) =$	=DISTR.NORM(K11,K6,RAIZ(K7),1)
donde	
d =	24

Además, la distribución de probabilidad de la duración del proyecto se aproxima a una distribución normal, cuya media es igual a 32.83 y su variancia 9.69, de hecho, esta probabilidad es solamente una aproximación de la verdadera probabilidad de cumplir con la fecha de entrega del proyecto, en este caso se supuso que la fecha de entrega del proyecto es de 24 semanas. La aproximación obtenida

difiere considerablemente de la probabilidad real, debido a las estimaciones optimista y pesimista, pues estas están dirigidas a los puntos terminales de la distribución de probabilidad. Por lo general, la probabilidad de ocurrencia de estos puntos es casi nula, por fortuna buenas estimaciones para  $\mu$  y  $\sigma^2$  están computarizadas.

También se puede intentar conseguir otras probabilidades para otras cantidades de tiempo, como por ejemplo: 30, 35 y 40 días, y luego observar el comportamiento de la probabilidad. Además, como también se necesita la distribución de probabilidad para el tiempo de terminación del proyecto, obtener esta distribución es casi siempre imposible, sobre todo por las complejas relaciones de precedencia entre las actividades. Por eso, en la práctica, se usa la distribución normal para aproximar la distribución del tiempo de terminación del proyecto. Para ello se necesitan las siguientes suposiciones:

- a) Las tareas que resultaron críticas utilizando los tiempos de tarea esperados siguen siendo críticas, incluso variando los tiempos de terminación reales de las actividades.
- b) El tiempo de terminación de cada tarea es independiente del tiempo de terminación de cualquier otra actividad.
- c) El tiempo de terminación del proyecto sigue una distribución normal con la media y variancia calculadas en b).

Es útil mencionar que PERT no proporciona información sobre el error al calcular la probabilidad de terminar un proyecto en un tiempo dado.

Algunas investigaciones han proporcionado aproximaciones analíticas más exactas de esta probabilidad, sin embargo, resultan también más complicadas (Kamburowski 1992). Una alternativa mejor y que se usa más comúnmente en la práctica es la técnica de simulación, en particular, la simulación Monte Carlo se puede implementar fácilmente en las hojas de cálculo, incorporando, además, los softwares @Crystal Ball® y @Risk®, desarrollados para ser utilizados en hojas electrónicas de manera sencilla y fácil de entender. Este método de simulación Monte Carlo es usado para mejorar la aproximación de PERT/CPM. Los temas anteriores se pueden complementar con las obras de Anderson, Sweeney y Williams (1999), Bierman, Bonini y Hausman (2000) y Eppen, Gould, Schmidt, Moore y Weatherford (2000).

## CONCLUSIONES

A pesar de haberse desarrollado hace muchos años PERT/CPM es una de las técnicas de la

Investigación de Operaciones de más aplicación, sobre todo porque proporciona al director del proyecto el marco básico para planear un proyecto, además de la siguiente información:

1. Identificación de las actividades necesarias para llevar a cabo el proyecto.
2. Estimación del tiempo que va a requerir cada tarea.
3. Identificar las actividades que preceden a otras.
4. Identificación de la red del proyecto cuyo propósito principal es visualizar las relaciones entre las actividades.
5. ¿Cuándo iniciar una tarea si no hay retrasos?
6. ¿Cuánto retraso se puede permitir en cada actividad sin demorar la terminación del proyecto?
7. Programar y presupuestar las tareas.
8. Encontrar la ruta crítica.
9. PERT/Costos, que investiga las maneras de reducir el tiempo de duración del proyecto con un costo adicional, planea, programa y controla los costos.
10. Métodos fáciles de entender y aplicar.
11. Manejo de la incertidumbre.

A pesar de lo eficiente que es, PERT/CPM tiene algunas deficiencias:

- a. Ya se observó la forma no muy eficiente de calcular  $\mu$  y  $\sigma^2$  en las duraciones de las actividades y, por tanto, también el cálculo de la probabilidad de terminar a tiempo el proyecto.
- b. Una suposición de PERT/CPM es que una actividad no inicia hasta que todos sus predecesores hayan terminado, lo cual en la realidad, a pesar de ser bastante razonable, es tosco. Se sabe que hay actividades que se pueden realizar simultáneamente, lo que ayuda a reducir el tiempo de duración del proyecto.

Aunque algunas actividades se puedan traslapar, esto no invalida a PERT/CPM, en la práctica una cantidad pequeña de traslapes nos puede proporcionar la holgura necesaria para poder compensar las demoras inesperadas que son inevitables en toda programación.



Sin embargo, PERT/CPM tiene una mejora y extensión que incorpora el manejo de actividades que se traslapan, se llama el método de diagramas de precedencias (PDM). Este método agrega a PERT/CPM flexibilidad y se puede proceder de forma bastante similar a PERT/CPM determinando tiempos de inicio más cercanos y más lejanos, investigando el equilibrio del truque entre tiempo y costo, etc. El problema, como mencionan Hillier F., Hillier M. y Lieberman G. (2002), es que este método casi no se conoce ni es tan usado como el anterior. El lector interesado en el PDM puede consultar a Badiru y Pulat (1995). Es natural que muchas mejoras y extensiones de PERT/CPM aparecerán en los próximos años, pero lo más importante es ir poco a poco incorporándolas en la administración de proyectos, con el fin de familiarizarse y, además, apreciar sus beneficios extras.

Por último, PERT/CPM supone que todas las actividades disponen de todos los recursos necesarios (personal, financiamiento, equipo, etc.) para llevar a cabo satisfactoriamente el proyecto. Sin embargo, en la realidad muchas veces se tienen recursos limitados y para el gerente se convierte en un reto la asignación de estos recursos a las distintas actividades. Casi siempre esto es lo que se hace y, por tanto, una vez asignados los recursos se puede aplicar PERT/CPM como siempre. Lo ideal sería asignar recursos de manera que la duración del proyecto se minimice. Al respecto hay investigaciones en este sentido, las cuales se quedan fuera del alcance de este artículo, pero el lector interesado puede buscar en internet material relacionado con el tema en cuestión.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el financiamiento del Proyecto N° 820-A2-115, del cual forma parte este trabajo.

## REFERENCIAS

- Anderson, D., D. Sweeney & T. Williams. 1999. *Métodos cuantitativos para los negocios*. Séptima edición. México. Editorial Thomson.
- Azarang, M. & E. García. 1996. *Simulación y análisis de modelos estocásticos*. México. McGraw-Hill.
- Badiru, A. & P. Pulat. 1995. *Comprehensive project management; Integrating optimization models, management principles, and computers*. Englewood Cliffs. New York. Prentice Hall.
- Bierman, H., C. Bonini & W. Hausman. 2000. *Análisis cuantitativo para la toma de decisiones*. México. McGraw-Hill.
- Eppen, G., F. Gould, C. Schmidt, Moore & Weatherford. 2000. *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa*. México. Prentice Hall.
- Evans, J. & D. Olson. 2002. *Introduction to Simulation and Risk Analysis*. New Jersey. Prentice Hall.
- Hillier, F. & G. Lieberman. 2000. *Investigación de operaciones*. México. McGraw-Hill.
- Hillier, F., M. Hillier & G. Lieberman. 2002. *Métodos cuantitativos para administración. Un enfoque y casos de estudio, con hoja de cálculo*. México. McGraw-Hill.
- Kamubrowski, J. 1992. *Bounding the distribution of project duration in PERT Networks*. *Operations Research Letters*, 12:17-22.
- Nassir Sapag Chain. 2001. *Evaluación de proyectos de inversión en la empresa*. México. Prentice Hall.