



Received: 05-02-2019  
Accepted: 13-02-2019

Anales de Edificación Vol. 5,  
Nº 1, 1-12 (2019)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2019.3910

## Estudio del efecto de la estimación del tiempo y el tamaño del búfer de proyecto en el Método de la Cadena Crítica. Study of the effect of tasks duration and project buffer size estimation in the Critical Chain Method.

Joaquín Fuentes<sup>a</sup>, Juan Pedro Ruiz<sup>a</sup>, Nelia Valverde<sup>a</sup> & Elena Navarro<sup>b</sup>

<sup>a</sup> University of Castilla-La Mancha (Spain, joaquin.fuentes@uclm.es; juanpedro.ruiz@uclm.es; nelia.valverde@uclm.es),

<sup>b</sup> Universitat Politècnica de València (Spain, enavarro@omp.upv.es)

---

**Resumen**— La aplicación del Método de la Cadena Crítica en la dirección y gestión de proyectos suscita abiertos debates sobre qué procedimiento de dimensionado del búfer se ha de utilizar y cuál ha de ser la duración de las actividades en la realización del cronograma. Se ha realizado una comparativa entre 4 métodos de dimensionado de búfers, empleando dos tipos de estimaciones de la duración de las tareas. Se ha determinado la probabilidad de cumplimiento de la fecha de finalización del proyecto obtenida con cada método a través de una simulación Monte Carlo. Tomando como criterio la probabilidad de cumplimiento, se ha demostrado que la duración media de las actividades tiene mayor efecto que un procedimiento específico de dimensionado del búfer. Aunque cada método de dimensionado genera una planificación diferente, el tamaño del búfer siempre aumenta la confiabilidad de la fecha de finalización del proyecto.

**Palabras clave**— Cadena Crítica; Goldratt; Búfer; Gestión de proyectos; Simulación Monte Carlo.

---

**Abstract**— Critical Chain Method application in Project Management generates open discussions about which buffer's sizing procedure should be used and what tasks duration should be considered in the realization of the timeline. A comparison has been carried out between 4 buffers' sizing methods, using two types of estimates for tasks duration. By means of a Monte Carlo simulation, each probability of project deadline compliance has been determined. Taking the probability of compliance as a criterion, it has been found that the use of average tasks durations has a greater effect than a specific sizing buffer's method. Although each sizing method generates a different planning, the buffer size always increases the reliability of the project's end date.

**Index Terms**— Critical Chain; Goldratt; Buffer; Project management; Monte Carlo simulation.

---

J. Fuentes del Burgo, J.P. Ruiz Fernández y N. Valverde Gascuña son profesores del Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación en la Escuela Politécnica de Cuenca, España.

E. Navarro Astor es profesora del Departamento de Organización de Empresas en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de Valencia, España.

## I. INTRODUCCIÓN

La dirección y gestión de proyectos es un área de investigación madura que usa métodos consolidados como PERT/CPM para realizar la planificación de las actividades y ayudar a la ejecución del proyecto (Shou & Yeo, 2000).

La planificación del proyecto genera un programa maestro que, además de permitir el análisis de costos y la asignación de recursos, proporciona al gerente del proyecto una perspectiva de cómo se desarrollará durante la ejecución (Chua, Shen & Bok, 2003). Hoy en día, los proyectos de construcción se han vuelto más complejos y únicos. El fundamento de una ejecución de éxito se basa en una planificación y supervisión adecuadas, tanto en la fase de diseño como en la fase de construcción (Bhushan & Raghavan, 2013).

Por consiguiente, la dirección y gestión de proyectos se ha convertido en una labor esencial en las organizaciones modernas, transformándose en una destreza que puede proporcionar a las empresas una ventaja competitiva importante (Shou & Yeo, 2000; Newbold, 2008).

En la fase de ejecución de muchos proyectos se ha demostrado con frecuencia que las actividades están sujetas a incertidumbres y variaciones considerables, que pueden llevar a numerosas interrupciones en el programa (Peng & Huang, 2013; Altarazi & Bao, 2015). Además, ante estas incertidumbres y variaciones parece que el empleo CPM no genera los resultados esperados (Yang, 2007; Correia & Abreu, 2011; Khamooshi & Cioffi, 2013).

La técnica de programación CPM tiene una antigüedad superior a 60 años, y persiste un problema de su aplicación a proyectos complejos, ya que no tiene en cuenta la limitación debida a la disponibilidad de recursos. Además, tampoco considera el efecto del síndrome del estudiante, la ley de Parkinson o la multitarea perjudicial (Yang, 2007; Liu & Whangbo, 2012). Así, se han documentado numerosos proyectos en los que no se han alcanzado los objetivos de tiempo, plazos y/o calidad establecidos (Cook, 1998; Elton & Roe, 1998; González & Alarcón, 2003).

También hay que añadir la tendencia de los clientes a evaluar a los proveedores en función del tiempo de entrega, otorgando a este factor tanta o más importancia que otros factores como el precio, la calidad o el servicio. Por tanto, cumplir en el tiempo de entrega se ha convertido en una ventaja competitiva (Souza & Moraes, 2016).

Como resultado de todo lo anterior, la validez de la programación determinista ha sido cuestionada o fuertemente criticada (Peng & Huang, 2013). El desarrollo de la gestión de proyectos por el Método de la Cadena Crítica (Critical Chain Project Management - CCPM), desarrollado por Goldratt (2001) como aplicación de la Teoría de las Restricciones (Theory of Constraints – TOC) al ámbito de los proyectos, trata de resolver la existencia de problemas crónicos que los

métodos, enfoques e incluso el software existente no han podido eliminar. Ejemplos de dichos problemas son los retrasos, los sobrecostos, la necesidad de reducir las especificaciones y otros efectos indeseables asociados a los entornos de proyectos (Rand, 2000; Yang, 2007). CCPM ha recibido mucha atención por parte de los profesionales, confirmándose que genera un plan de producción más estable y una fecha de finalización más fiable que los métodos consolidados (Altarazi & Bao, 2015).

Tradicionalmente, para compensar la incertidumbre, los tiempos de las actividades están sobredimensionados, añadiendo un tiempo de seguridad a la duración de las tareas (Souza & Moraes, 2016). Uno de los principales elementos de CCPM es eliminar ese tiempo de seguridad y acumularlo en forma de búfers situados al final de una secuencia o cadena de tareas. Este enfoque trata de minimizar el riesgo de sobrepasar la fecha de finalización del proyecto, a la par que acortar la fecha de finalización (Slusarczyk, Kuchta, Verhulst, Huyghe, Laurysen & Debal, 2013; Souza & Moraes, 2016).

Al igual que en las cadenas de fabricación, el dimensionado del búfer es un aspecto fundamental. Su tamaño debe ser suficiente para asegurar el trabajo de las actividades sucesoras, puesto que, si el tamaño es inadecuado, puede crear un tiempo de inactividad improductivo (Park & Peña-Mora, 2004). Así, los búfers de tiempo utilizados en CCPM tienen la misma función que los búfers empleados en los sistemas productivos, que es tratar de mantener constante el flujo del programa de producción (Horman, Messner, Riley & Pulaski, 2003).

Los búfers se incluyen como tareas en la planificación del proyecto, pero no tienen trabajo asignado. Así, el tamaño del búfer representa una protección de seguridad para cubrir las posibles variaciones en los tiempos de ejecución de las tareas (Altarazi & Bao, 2015).

El tamaño del búfer presenta una paradoja a resolver, pues cuanto mayor es su duración más seguro y fiable es el tiempo de finalización planificado del proyecto, pero al aumentar el plazo de finalización del proyecto se genera una pérdida de competitividad y un mayor costo (Altarazi & Bao, 2015). Por tanto, decidir el tamaño adecuado del búfer es complicado, debe estar orientado al proyecto y varía de un caso a otro (Yang, 2007).

Para calcular la duración de los búfers insertados en las cadenas de actividades Goldratt propuso considerar el 50% de la duración de la cadena (Goldratt, 2001). La falta de justificación científica del método de dimensionado ha dado lugar a la investigación centrada en los búfers, el cálculo de su tamaño y su colocación en el cronograma (Slusarczyk et al., 2013).

Actualmente, el cálculo del tamaño del búfer continúa siendo una pregunta abierta. Cada procedimiento de dimensionado puede tener ventajas e inconvenientes que dependen del

proyecto que se está programando. Además, cada método genera una programación única (Slusarczyk et al., 2013).

También la forma en la que se realice la estimación de la duración de las tareas afecta tanto al tamaño del búfer como a la extensión del proyecto (Yang, 2007). Otra controversia que ha generado mucha crítica es la manera en la que Goldratt propone realizar la estimación de la duración de las tareas y la aplicación de la Regla del 50% (Rezaie, Manouchehrabadi Shirkouhi, 2009).

El objetivo de este trabajo es realizar una comparación entre algunos procedimientos de dimensionado de búfers, estimando la probabilidad de que el proyecto se complete a tiempo como medida de éxito. También se estudia cómo afecta la estimación de la duración de las tareas a la extensión del proyecto y a la probabilidad de cumplimiento.

El artículo continúa con una descripción de las características fundamentales de CCPM, se analizarán algunas propuestas de estimación de tiempo de las tareas y se describirán cuatro procedimientos de dimensionado de búfers. Seguirá el apartado de metodología para continuar con el de resultados y discusión. Finalizará con unas breves conclusiones.

II. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE CCPM

Resumiendo, las características originales del procedimiento, el cronograma se obtiene con dependencias del tipo fin-comienzo, y las actividades se secuencian aplicando el criterio de iniciarlas lo más tarde posible (As Late As Possible - ALAP).

Goldratt (2001) considera que los responsables de realizar las tareas hacen la estimación de su duración más pesimista (aquella en la que se ha incluido el máximo tiempo de protección individual a la actividad). Con objeto de eliminar esa protección añadida, Goldratt propone que al hacer la programación, la duración de las tareas sea el 50% de la estimación propuesta por los responsables (figura 1). Leach (2014) denomina a esta práctica la Regla del 50%.

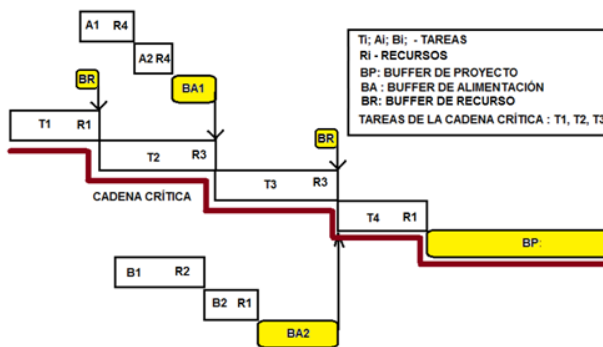


Fig. 1. Aplicación de los búfers en CCPM (Adaptado de Goldratt, 2001. Elaboración propia).

La seguridad se agrega al finalizar el proyecto, añadiendo un tiempo de protección denominado búfer de proyecto. En el caso

de secuencias de tareas que no se encuentren en la ruta más desfavorable, se añaden los tiempos de protección al finalizar dichas secuencias, antes de enlazar con la actividad sucesora que se encuentra en la ruta más desfavorable (Tenera, 2008).

Se puede definir la cadena crítica como la secuencia de actividades que generan el camino de mayor longitud para la finalización del proyecto, después de eliminar los conflictos entre las tareas que comparten recursos (Souza & Moraes, 2016). De acuerdo a TOC, la principal restricción de cualquier proyecto es el tiempo consumido para completar las actividades que pertenecen a la cadena crítica (Jan & Ho, 2006).

En la literatura se ha criticado la forma en la que CPM trata a la incertidumbre de igual manera en todas las actividades, pertenezcan o no al camino crítico. Como se observa en la Fig. 2, en CPM el tiempo de seguridad se añade al final de cada actividad, mientras que en el enfoque CCPM la seguridad se agrega, ajusta y sitúa en posiciones estratégicas para proteger toda la cadena (Shou & Yeo, 2000).

Los principales búfers que se utilizan en la CCPM son el búfer del proyecto, el búfer de alimentación y el búfer de recursos.

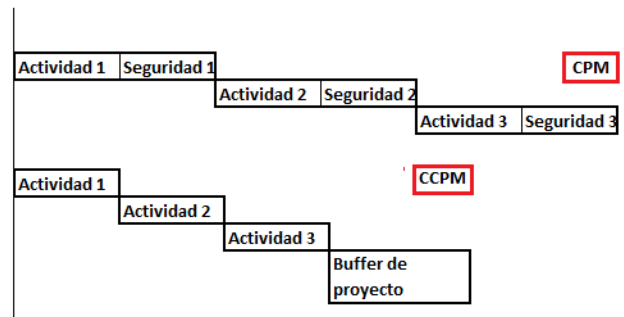


Fig. 2. Comparativa del enfoque de la seguridad en CPM y en CCPM (Fuente: Shou & Yeo, 2000. Elaboración propia).

El búfer de proyecto se agrega al final de la cadena crítica y su función es proteger la fecha de vencimiento planificada de la variación y de la incertidumbre. Según Leach (2014), los búfers explotan la ley estadística de agregación, protegiendo el proyecto de las incertidumbres de las tareas individuales mediante protecciones compartidas.

Los búfers de alimentación protegen a la cadena crítica de la incertidumbre y los retrasos que se puedan producir en las actividades de las cadenas no críticas que se fusionan con la cadena crítica (Jan & Ho, 2006).

Como en los sistemas productivos, los búfers de alimentación y proyecto absorben las fluctuaciones y problemas, permitiendo la variación en los ratios de producción en las tareas, evitando que la fecha de finalización del proyecto oscile cuando las tareas críticas de la cadena no se realizan de acuerdo con el cronograma (Hagemann, 2001; Sakamoto, Horman & Randolph, 2002). Así, la resolución de los conflictos

de recursos compartidos y la inserción de los búfers ayuda a reducir el riesgo de la programación (Hagemann, 2001).

El búfer de recursos no consume tiempo, se inserta en cada punto donde el trabajo pasa de un recurso a otro diferente en la cadena crítica. Este elemento permite al gestor del proyecto avisar a los recursos de las tareas críticas para que estén preparados antes del comienzo inmediato de dicha actividad (Geekie & Steyn, 2008).

Finalmente, en los procesos de fabricación, la gestión del búfer se aplica para controlar el trabajo en curso (Chua, Shen & Bok, 2003). Así, durante la ejecución del proyecto, la gestión de los búfers permite desarrollar un plan de construcción riguroso que protege contra las incertidumbres y reduce el impacto potencial de los cambios que se pueden producir durante la ejecución (Jan & Ho, 2006).

### III. ESTIMACIÓN DE LA DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Newbold (1998) afirma que las fluctuaciones estadísticas existen y que se han de tener en cuenta en la estimación de las duraciones. Además, no se puede predecir con exactitud su magnitud.

La distribución de probabilidad de la duración de una tarea en proyectos suele ser asimétrica. Se tiene una gran punta cerca del comienzo y una larga cola a la derecha (Goldratt, 2001). Cada tarea requiere un tiempo mínimo, pero al considerar la incertidumbre, puede necesitar un tiempo muy superior para completarse (Goldratt, 2001). A pesar de la lógica de la suposición anterior, utilizar una distribución sesgada a la derecha todas las veces puede ser cuestionable, sobre todo si no hay datos históricos que respalden dicho supuesto (Reazie et al., 2009).

Cuando se usa como estimación el tiempo medio, se asegura que la tarea se concluirá con una probabilidad de cumplimiento del 50%. Como norma, los tiempos de duración de las actividades en proyectos se suelen estimar con una protección o seguridad que proporciona una probabilidad igual o superior al 90% (Iglesias, 2005).

Para Newbold (2008), la Regla del 50% es demasiado conservadora en algunos casos, mientras que en otros casos puede ser agresiva. Cuando los responsables de ejecutar una tarea o proyecto tienen mucha experiencia en su realización, un porcentaje del 30% puede ser adecuado. En otras ocasiones, cuando existe una gran incertidumbre, el 50% puede ser insuficiente. Además, reducir las estimaciones a la mitad y considerar estas estimaciones como la base del cronograma puede generar un riesgo, especialmente en proyectos en los que las actividades se realizan principalmente con máquinas (Rezie et al., 2009).

Según Shou y Yeo (2000), la propuesta de Goldratt no es racional. Usando la Fig. 3, en actividades de proyectos con una gran varianza,  $W_i$  es mucho mayor que  $D_i$ , y la probabilidad de

cumplimiento es mucho mayor que dos veces la desviación estándar  $\sigma$ . En otros casos, algunas actividades con poca varianza,  $W_i$  puede estar muy cerca de  $D_i$ , por lo que será imposible completar las actividades en la mitad de  $W_i$ .

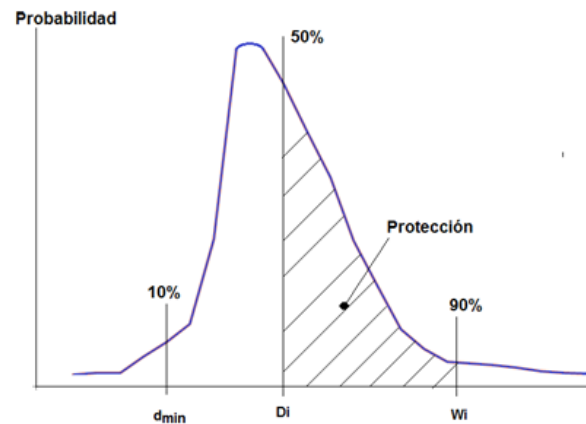


Fig. 3. Estimación de la duración de las actividades (Fuente: Shou & Yeo, 2000. Elaboración propia).

También hay actividades que no se pueden comprimir, como las que dependen de la entrega de algún suministro o equipo (Mattos & Valderrama, 2014), o aquellas asociadas al propio sistema constructivo, como puede ser el tiempo de fraguado del hormigón fresco en las estructuras de este tipo. Ese tiempo suele ser fijo o venir influenciado por condiciones atmosféricas que difícilmente se pueden controlar (Medina, 2008).

Para Jan y Ho (2006), la Regla del 50% es demasiado arbitraria y difícil de aplicar en el mundo real de la industria de la construcción. En este sector, la estimación de la duración de cada actividad suele hacerse en base a la experiencia del planificador o calcularse por la tasa promedio de producción de trabajo. También se emplean los datos de rendimiento recogidos en bases de precios comerciales, aunque según Yang (2007), en la industria de la construcción la productividad de equipos de trabajo diferentes es impredecible.

En el sector de la construcción, la estimación generalmente es superior al tiempo promedio porque los planificadores siempre agregan tiempo de seguridad a la actividad para protegerla de cualquier incertidumbre (Jan & Ho, 2006). A pesar de lo anterior, Khamooshi y Cioffi (2013) señalan que hay evidencias de un sesgo de optimismo en las estimaciones de tiempo y de costo de las actividades. En muchos proyectos la duración planificada, en el mejor de los casos, termina siendo el tiempo real mínimo necesario para realizar el trabajo.

Por otro lado, Mohamed y Tucker (1996) identificaron que la pérdida de tiempo en el sector de la construcción es sustancial. El tiempo perdido puede estar oculto en alguna operación de construcción o explícito en forma de retrasos y reelaboraciones. Encontraron que el tiempo perdido en paquetes de trabajo de construcción es del orden del 25%. Por

tanto, la duración de las actividades se podría determinar multiplicando la estimación realizada por un 75% (Yang, 2007).

Por su parte, Jan y Ho (2006) proponen un procedimiento para estimar la duración de las tareas en proyectos de construcción. Se han de realizar dos preguntas a los ingenieros o encargados responsables de cada actividad. La primera pregunta es: "¿En cuánto tiempo se podría realizar esta actividad según su experiencia previa?" La segunda pregunta es: "¿En cuánto tiempo se podría realizar esta actividad si todo transcurre bien y dispone de todos los requisitos (materiales, equipo, etc.) que necesita al inicio?"

La respuesta a la primera pregunta proporciona la estimación de la duración inicial "protectora" (equivalente a  $W_i$  de la Fig. 3), mientras que la respuesta a la segunda pregunta proporciona la duración de la estimación "razonable" (equivalente a  $D_i$  de la Fig. 3).

Con estas dos estimaciones, se pueden evaluar los tiempos y determinar la duración asignada a cada actividad. El tiempo de seguridad de cada actividad sería la estimación de protección menos una estimación razonable ( $W_i - D_i$ ). Un resultado de su investigación es que el tiempo de seguridad añadido está comprendido entre un 10% y 20% de la estimación adecuada.

Por su parte, Newbold (2008) propone utilizar dos estimaciones. La estimación de duración de bajo riesgo (low-risk duration - LRD) y la duración fija (focused duration - FD). Propone que, por defecto, la duración de bajo riesgo sea el doble de la duración fija y la diferencia de ambas sea la que se considere en el dimensionado de los búfers: (LRD - FD). Esa diferencia será el tiempo de seguridad que tiene en cuenta la incertidumbre y será el que se emplee en el cálculo del búfer. Newbold (2008) incide en la necesidad de no tratar por igual a todas las tareas. Por ejemplo, habrá algunas cuyo tiempo de ejecución será único, coincidiendo la duración de bajo riesgo con la fija, por lo que no aportarían tiempo al cálculo del búfer.

#### IV. PROCEDIMIENTOS DE DIMENSIONADO DEL BÚFER

Los procedimientos siguientes se pueden aplicar tanto al dimensionado del búfer de proyecto como del búfer de alimentación.

##### A. Regla de Cortar y Pegar (*Cut & Paste Method – C&PM*)

Es el procedimiento de dimensionado propuesto por Goldratt (2001). Se reduce la duración pesimista de cada tarea en un 50% y se calcula el tamaño del búfer como el 50% de la duración resultante de la cadena crítica o de la cadena de actividades que alimentan a la cadena crítica. Así, se denomina como  $W_i$  a la estimación con mayor protección de las tareas, con una probabilidad del cumplimiento del 90%, el tamaño del búfer (TB) se calcula con la ecuación (1):

$$TB = 0,5 \left[ \sum (0,5 W_i) \right] \quad (1)$$

Este procedimiento implica una reducción de la duración del proyecto en un 25% (Geekie & Steyn, 2008), es sencillo de aplicar y normalmente proporciona un búfer de tamaño suficiente, aunque aumenta de forma lineal con el tamaño de la cadena crítica (Leach, 2014).

Kendall, Pitagorsky y Hulett (2001) afirman que el dimensionado del búfer que realizan los administradores de proyectos depende en gran medida del entorno, del riesgo existente y de la variabilidad de las duraciones de las tareas. En la práctica, se emplean valores comprendidos entre el 30% y el 50% de la duración de la secuencia de tareas.

Otra forma de aplicarlo sería utilizando las dos estimaciones de tiempo que proponen Jan y Ho (2006), con  $W_i$  para la duración protectora y  $D_i$  para la estimación razonable. El cronograma se realiza con la duración correspondiente a la estimación razonable  $D_i$ , suponiendo que el 50% de las veces la actividad se realizará en ese tiempo. El tamaño del búfer se podría calcular con la ecuación (2), considerando el 50% de la suma de las diferencias de ambas duraciones ( $W_i - D_i$ ):

$$TB = 0,5 \left[ \sum (W_i - D_i) \right] \quad (2)$$

##### B. Raíz cuadrada de la suma de cuadrados (*Square Root of Sum of Squares – SSQ*)

Newbold (1998) propone este método, recomendándolo cuando el riesgo varíe mucho de una actividad a otra. Asume que la duración de las tareas se ajusta a una distribución lognormal y que las tareas deberían estar completadas dentro de la situación más desfavorable, considerando una estimación de riesgo bajo con una probabilidad de cumplimiento del 90% (equivalente a la duración  $W_i$ ). El tamaño del búfer sería la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la diferencia entre la duración de bajo riesgo de las tareas,  $W_i$ , y la duración media de cada tarea,  $D_i$ , (3).

$$TB = 2 \cdot \sqrt{\sum \left( \frac{W_i - D_i}{2} \right)^2} \quad (3)$$

##### C. Tamaño del búfer en función de la evaluación de la clase de riesgo

Este procedimiento recibe diversos nombres. Geekie & Steyn (2008) lo denominan como búfer proporcional a la dispersión relativa, mientras que Slusarczyk et al. (2013) lo designan evaluación de la clase de riesgo. La propuesta inicial del método la realizaron Shou & Yeo (2000), indicando que se podía utilizar para calcular tanto el búfer de proyecto como los búfers de alimentación.

Shou & Yeo (2000) recomiendan clasificar las actividades en función de su dispersión relativa (RD), calculada con la expresión (4). En ella,  $\sigma$  es la desviación estándar de cada actividad y  $D_i$  es su duración media. Afirman que la dispersión

relativa es un indicador apropiado para estimar la incertidumbre de una actividad.

$$RD = \sigma / Di \quad (4)$$

Cuanto mayor sea la dispersión relativa, mayores serán las probabilidades de que la actividad tenga una duración muy superior a la duración media estimada, lo que implica una mayor incertidumbre.

Shou y Yeo (2000) realizaron una clasificación de la incertidumbre de las tareas en función de su varianza, pero no facilitaron los criterios para poder relacionar el rango de valores de RD con las categorías A, B, C y D (Geekie & Steyn, 2008). Este inconveniente lo han resuelto Slusarczyk et al. (2013) al proponer un criterio para establecer la clase de riesgo, según el valor de RD, empleando la Tabla I.

TABLA I  
CLASIFICACIÓN DE LA TAREA EN FUNCIÓN DE SU DISPERSIÓN RELATIVA  
(FUENTE: SLUSARCZYK ET AL., 2013. ELABORACIÓN PROPIA)

Rango de RD	Nivel de incertidumbre	Clasificación
0 – 0,13	Incertidumbre muy baja	A
0,14 – 0,19	Incertidumbre baja	B
0,20 – 0,25	Incertidumbre alta	C
0,26 – 1	Incertidumbre muy alta	D

El tamaño del búfer intermedio por actividad se obtiene multiplicando la duración media estimada ( $D_i$ ) por el porcentaje recogido en la Tabla II, en función de la clase de riesgo estimado. Shou & Yeo (2000) indican que el tiempo de seguridad de todas las actividades debe estimarse con el mismo nivel de seguridad.

TABLA II  
TAMAÑO DEL BÚFER PARA DIFERENTES CLASES DE ACTIVIDAD Y NIVELES DE SEGURIDAD (FUENTE: SHOU & YEO, 2000. ELABORACIÓN PROPIA)

Clasificación	Seguridad baja	Seguridad media	Seguridad $\epsilon$
A	4%	8%	12%
B	12%	24%	36%
C	20%	40%	60%
D	28%	57%	85%

Finalmente, el búfer total se obtiene como la suma de todos los búfers de las actividades de una cadena (Slusarczyk et al., 2013).

#### D. El método de la raíz cuadrada de los tiempos de seguridad con números difusos (Long & Ohsato, 2008)

El procedimiento propuesto por Long & Ohsato (2008) se basa en estimar la incertidumbre de cada actividad usando un conjunto difuso con una distribución trapezoidal TrFN ( $a, b, c, d$ ) (Fig. 4), proporcionado por expertos en la ejecución de la tarea que tengan en cuenta la disponibilidad de obreros,

materiales, experiencia, etc.

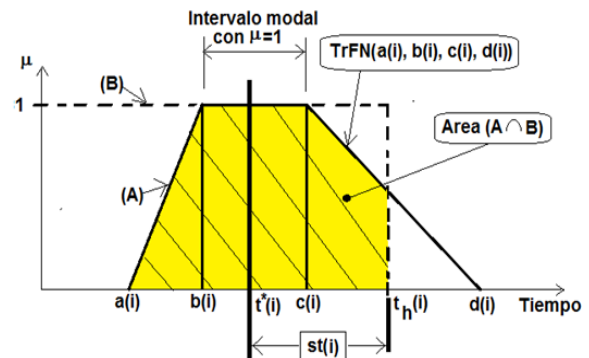


Fig. 4. Duración de la actividad ( $th$ ) con un grado de acuerdo  $AI= 0,9$   
(Fuente: Long & Ohsato, 2008. Elaboración propia).

La desviación estándar,  $st(i)$ , de la duración de una actividad vendría dada por la diferencia entre el tiempo de seguridad de la actividad  $i$ ,  $th(i)$ , menos la duración determinista de la actividad con la mayor probabilidad de producirse,  $t^*(i)$  ( $\mu= 1$ ):

$$st(i) = th(i) - t^*(i) \quad (5)$$

El tiempo de seguridad de la actividad  $i$ ,  $th(i)$ , se calcula con un grado de acuerdo ( $AI$  – Agreement Index) igual a 0,9, empleando la expresión (7).

$$AI(A, B) = 0,9 \quad (6)$$

$$AI(A, B) = \frac{\frac{(c(i) - b(i) + d(i) - a(i))}{2} \cdot \frac{(d(i) - th(i))^2}{2(d(i) - c(i))}}{\frac{(c(i) - b(i) + d(i) - a(i))}{2}} = 0,9 \quad (7)$$

Long y Ohsato (2008) incluyen un ejemplo en el cual, si la duración de la actividad se estima con el conjunto difuso  $TrFN(4, 6, 8, 12)$ , con un  $AI= 0,9$ , la duración de la actividad,  $th$ , será de 10 días.

El tamaño del búfer ( $TB$ ) vendrá dado por la expresión (8), donde  $k$  es el número de tareas de la cadena crítica o de alimentación.

$$TB = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=k} st(i)^2} \quad (8)$$

## V. METODOLOGÍA

Para hacer la comparativa se aplicarán los procedimientos de dimensionado al proyecto cuyas características se resumen en las Tablas III y IV. Además, dicha comparativa se realizará con una simulación Monte Carlo, al ser un método muy empleado para analizar la probabilidad de completar los proyectos (Hoel & Taylor, 1999).

Para poder realizar la simulación Monte Carlo se han considerado las tres duraciones de la tarea que establece el método PERT, la optimista ( $O_i$ ), la media ( $M_i$ ) y la pesimista

(Pi), pero aplicadas a una distribución triangular (Fig. 5). Empleando esos valores, con la expresión (9) se ha calculado la duración media esperada de cada actividad (Di) y la varianza  $\sigma^2$ , con la expresión (10) (Mattos & Valderrama, 2014; Altarazi & Bao, 2015).

$$D_i = (O_i + P_i + M_i)/3 \tag{9}$$

$$\sigma^2 = (O_i^2 + P_i^2 + M_i^2 - O_i \cdot P_i - O_i \cdot M_i - M_i \cdot P_i)/18 \tag{10}$$

TABLA III  
DATOS DEL PROYECTO ANALIZADO (ELABORACIÓN PROPIA)

Tarea	Precedente	Recursos	Duraciones PER		
			Oi	Mi	Pi
A	-	R1, R2	6	12	22
B	A	R3	2	4	6
C	A	R1	4	5,5	6
D	B	R1	4	5	6
E	D	R2, R3	15	18	22
F	C	R2	28	32	35
G	E	R1	20	26	30
H	D	R3	11	12	15
I	H	R1, R2, R3	11	14	17
J	F, G, I	R2	4	5,5	6

TABLA IV  
DATOS DEL PROYECTO ANALIZADO (ELABORACIÓN PROPIA)

Tarea	Di	$\sigma^2$	Wi	TrFN(a(i), b(i), c(i), d(i))			
				a(i)	b(i)	c(i)	d(i)
A	10,7	2,9	14,4	6	9	12	16
B	4,0	0,7	4,9	2	3	5	6
C	5,2	0,2	5,4	4	5	6	7
D	5,0	0,2	5,2	4	5	6	7
E	18,3	2,1	21,0	15	17	20	23
F	31,7	2,1	34,3	28	30	33	36
G	25,3	4,2	30,7	20	23	27	31
H	12,7	0,7	13,6	11	12	14	15
I	14,0	1,5	15,9	11	13	15	18
J	5,2	0,2	5,4	4	5	6	7

La estimación segura de las tareas (Wi) en la Tabla IV se determina considerando una distribución lognormal, empleando la duración media de la actividad Di, la desviación estándar  $\sigma$  y una probabilidad de cumplimiento del 90%, con la función de EXCEL® =LN(DISTR.LOG.INV(0,9;Di; $\sigma$ )).

Finalmente, para estimar el número trapezoidal que determina la duración de las tareas TrFN (a(i), b(i), c(i), d(i)) y con objeto de que esté relacionado con las duraciones iniciales, se ha aplicado el siguiente criterio: el valor inferior coincide con la duración optimista, es decir, a(i)= Oi; b(i)= Di -  $\sigma$ ; c(i)= Di+ $\sigma$  y d(i) = Di + 3· $\sigma$ , redondeando todos los resultados a un número entero.

La simulación Monte Carlo se ha realizado empleando el software EXCEL®, al ser una herramienta muy versátil y empleada en otras investigaciones (Geekie & Steyn, 2008; Slusarczyk et al., 2013; Altarazi & Bao, 2015).

La estimación de la duración de las tareas en cada ciclo de la simulación se ha calculado con una distribución triangular (Fig. 5 (A)), con los tres valores O, P y M (Mattos & Valderrama, 2014).

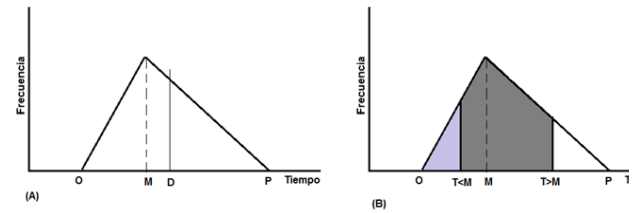


Fig. 5. Distribución de probabilidad triangular (Fuente: Mattos & Valderrama, 2014. Elaboración propia).

Para que los datos de entrada tengan la misma distribución de probabilidades se generan números pseudo-aleatorios con la función =ALEATORIO(). El área bajo la curva en la distribución triangular es la unidad (Fig. 5 (B)), por lo que dada una probabilidad p que quede en la parte izquierda del triángulo, el área del triángulo a su izquierda viene dada por la expresión (11) (Mattos & Valderrama, 2014):

$$p = (T - O)^2 / [(P - O)(M - O)] \tag{11}$$

La duración que le corresponde se determina con la siguiente expresión:

$$T = O + [p \cdot (P - O)(M - O)]^{1/2} \tag{12}$$

Si T resulta mayor que M, la duración se obtiene con la expresión (13).

$$T = P - [(1 - p) \cdot (P - M) \cdot (P - O)]^{1/2} \tag{13}$$

Se realizan 1.000 ciclos, obteniendo las duraciones de las actividades con las expresiones (12) y (13), utilizando un número pseudo-aleatorio distinto en cada actividad y en cada ciclo con objeto de evitar la aparición de correlaciones (Mattos & Valderrama, 2014).

Cada ciclo proporciona las duraciones que corresponden a cada camino crítico. Finalmente se determina la media de las 1.000 duraciones del camino crítico y su desviación estándar (Mattos & Valderrama, 2014).

Empleando la herramienta de análisis “Histograma”, en la opción “Análisis de datos” de EXCEL®, se calculan las frecuencias individuales y acumulativas de todas las duraciones máximas calculadas, obteniendo también la línea de porcentaje acumulado para el tiempo de finalización del proyecto en el gráfico del histograma (Altarazi & Bao, 2015).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a la configuración de la red propuesta, al realizar los 1.000 ciclos siempre se cumple que la ruta crítica corresponde a la secuencia formada por las tareas A, B, D, E, G y J. En la

Fig. 6 se muestra la planificación empleando la duración con máxima protección de las actividades ( $W_i$ ). Los datos estadísticos de la simulación Monte Carlo se resumen en la Tabla V, obtenidos con la herramienta de EXCEL® Estadística descriptiva de la opción “Análisis de datos”.

TABLA V  
ESTADÍSTICAS DE LOS 1.000 CICLOS DE LA SIMULACIÓN MONTE CARLO  
(ELABORACIÓN PROPIA)

Duración media del proyecto (días)	Desviación estándar $\sigma$	Varianza de la muestra $\sigma^2$	Duración máxima (días)	Duración mínima (días)
67,5	3,345	11,189	77,7	57,4

El histograma y la curva de distribución de probabilidad acumulada (Fig. 7) muestran la relación entre las probabilidades de completar el proyecto y el tiempo total de ejecución. Dicha curva se utiliza para estimar la probabilidad de cumplimiento del proyecto (Hoel & Taylor, 1999; Altarazi & Bao, 2015).

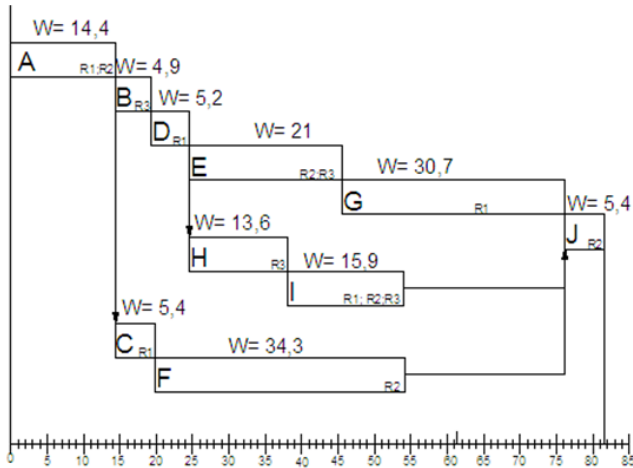


Fig. 6. Diagrama de Gantt del proyecto con las duraciones  $W_i$  (Elaboración propia).

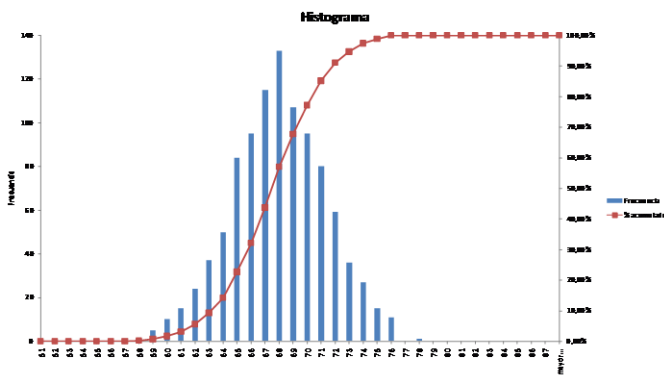


Fig. 7. Histograma y curva de porcentaje acumulado de la duración total del proyecto en la simulación Monte Carlo (Elaboración propia).

La duración del proyecto, aplicando los procedimientos de dimensionado del búfer descritos, es el resultado de sumar la

longitud de la cadena crítica más el tamaño del búfer de proyecto.

A excepción del procedimiento C&PM con (1), la extensión del proyecto se obtiene usando la duración media de las tareas,  $D_i$ , asumiendo una probabilidad de cumplimiento del 50% de las veces que se ejecuten (Jan & Ho, 2006). Así, la duración total de las tareas que forman la cadena crítica será:  $DA + DB + DD + DE + DG + DJ = 10,7 + 4,0 + 5,0 + 18,3 + 25,3 + 5,2 = 68,5$  días.

En el caso del C&PM se realiza la comparación empleando dos duraciones de las actividades. En primer lugar, se utiliza la propuesta de Goldratt (2001) de usar la duración con mayor protección,  $W_i$ , y aplicar la Regla del 50% a dicho valor en (1). En este caso, la longitud de las tareas de la cadena crítica será de  $0,5 \cdot \sum W_i = 40,8$  días. En segundo lugar, se utiliza la propuesta de Jan y Ho (2006), de emplear la estimación razonable de las tareas que coincide con la duración media de las tareas,  $D_i$  (2).

Los resultados del tamaño del búfer de proyecto y la duración total del proyecto aplicando los procedimientos de dimensionado descritos en los apartados anteriores y su probabilidad de cumplimiento se muestran en la Tabla VI.

TABLA VI  
DURACIÓN DEL PROYECTO, TAMAÑO DEL BÚFER DE PROYECTO Y PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA)

Método	TB <sup>a</sup> (días)	D-CC <sup>a</sup> (días)	DP <sup>c</sup> (días)	TB/D-CC <sup>d</sup> (%)	Prob. Cump. <sup>e</sup>
C&PM con duraciones $W_i$ (1)	20,4	40,8	61,2	50%	3,6%
C&PM con duraciones $D_i$ (2)	6,5	68,5	75,0	9,5%	98,8%
SSQ	7,1	68,5	75,6	10,4%	99,5%
Evaluación de clase de riesgo. Seguridad baja	4,2	68,5	72,7	6,1%	91,7%
Evaluación de clase de riesgo. Seguridad media	8,5	68,5	77,0	12,4%	99,9%
Evaluación de clase de riesgo. Seguridad alta	12,7	68,5	81,2	18,5%	100%
Método de Long & Ohsato (2008)	5,7	68,5	74,2	8,3%	97,6%

<sup>a</sup>Tamaño del búfer de proyecto; <sup>b</sup>Duración de la Cadena Crítica; <sup>c</sup>Duración del proyecto; <sup>d</sup>Relación TB/D-CC; <sup>e</sup>Probabilidad de cumplimiento.

La simulación realizada permite especificar el nivel de confiabilidad para completar con éxito el proyecto en función del procedimiento de dimensionado de búfer escogido. Empleando como criterio el nivel de confiabilidad, todos los procedimientos presentan una confiabilidad superior al 90%, que se puede considerar como un nivel adecuado (Altarazi & Bao, 2015), con la excepción del nivel obtenido aplicando el método C&PM con duraciones de tareas  $0,5 \cdot W_i$  (ecuación (1)).

A pesar de que el tamaño del búfer obtenido con el método C&PM y la ecuación (1) es el mayor de todos los métodos, al reducir las duraciones de las tareas al cincuenta por ciento de su



duración  $W_i$ , la duración total del proyecto (DP) es inferior a la duración media obtenida con la simulación Monte Carlo. Esto hace que la probabilidad de cumplimiento de plazos sea muy baja, presentando un riesgo de incumplimiento muy elevado.

Acorde a la opinión de Shou y Yeo (2000), aplicar sistemáticamente la Regla del 50% a las estimaciones pesimistas de todas las tareas puede que no sea una práctica realista ni segura. Según Goldratt (2001), los responsables de ejecutar las actividades siempre desean disponer de seguridad y añaden mucho tiempo de protección a la estimación, pero tras la simulación se comprueba que reducir dicha estimación a la mitad puede generar planificaciones con una probabilidad de cumplimiento baja.

La elección del procedimiento de dimensionado del búfer dependerá del riesgo que se desee asumir por la gerencia del proyecto (Altarazi & Bao, 2015). Los procedimientos que proporcionan una probabilidad de cumplimiento inferior al 95% serían la evaluación de clase de riesgo con una seguridad baja y C&PM (1). Además de lo anterior, el nivel de confianza que se alcanza está también relacionado con el criterio de escoger la duración media de las tareas al hacer la planificación.

Los resultados de la Tabla VI permiten escoger el procedimiento de dimensionado para proyectos en los que se desee tener un riesgo bajo y aquéllos en los que se pueda tener un riesgo alto. Como señalan Slusarczyk et al. (2013), el

método a escoger dependerá de la aversión al riesgo que tenga el gestor del proyecto. Si éste es adverso al riesgo escogerá utilizar el procedimiento de evaluación de clase de riesgo con seguridad media o alta.

Por otro lado, la Fig. 8 permite observar la duración del proyecto obtenida con cada método de dimensionado y compararla con las 1.000 duraciones obtenidas en la simulación Monte Carlo. Se comprueba que los resultados obtenidos con los procedimientos de evaluación de clase de riesgo con seguridad media y alta quedan por encima de la duración máxima obtenida con Monte Carlo. Esto significa que escoger dichos procedimientos puede sobredimensionar el tiempo esperado de ejecución y suponer una pérdida de competitividad para la empresa.

Las duraciones de proyecto con los procedimientos de evaluación de clase de riesgo con seguridad baja, SSQ, C&PM (2) y Long y Ohsato (2008) generan duraciones de proyecto que se encuentran entre los valores máximos conseguidos con la simulación Monte Carlo, siempre por encima del valor medio de la duración del proyecto reflejado en la Tabla V.

En aquellos proyectos en los que no se disponga de mucha información sobre la duración de las actividades, pero en los que se pueda disponer de la opinión de expertos para obtener la distribución trapezoidal de la duración de las tareas, el empleo

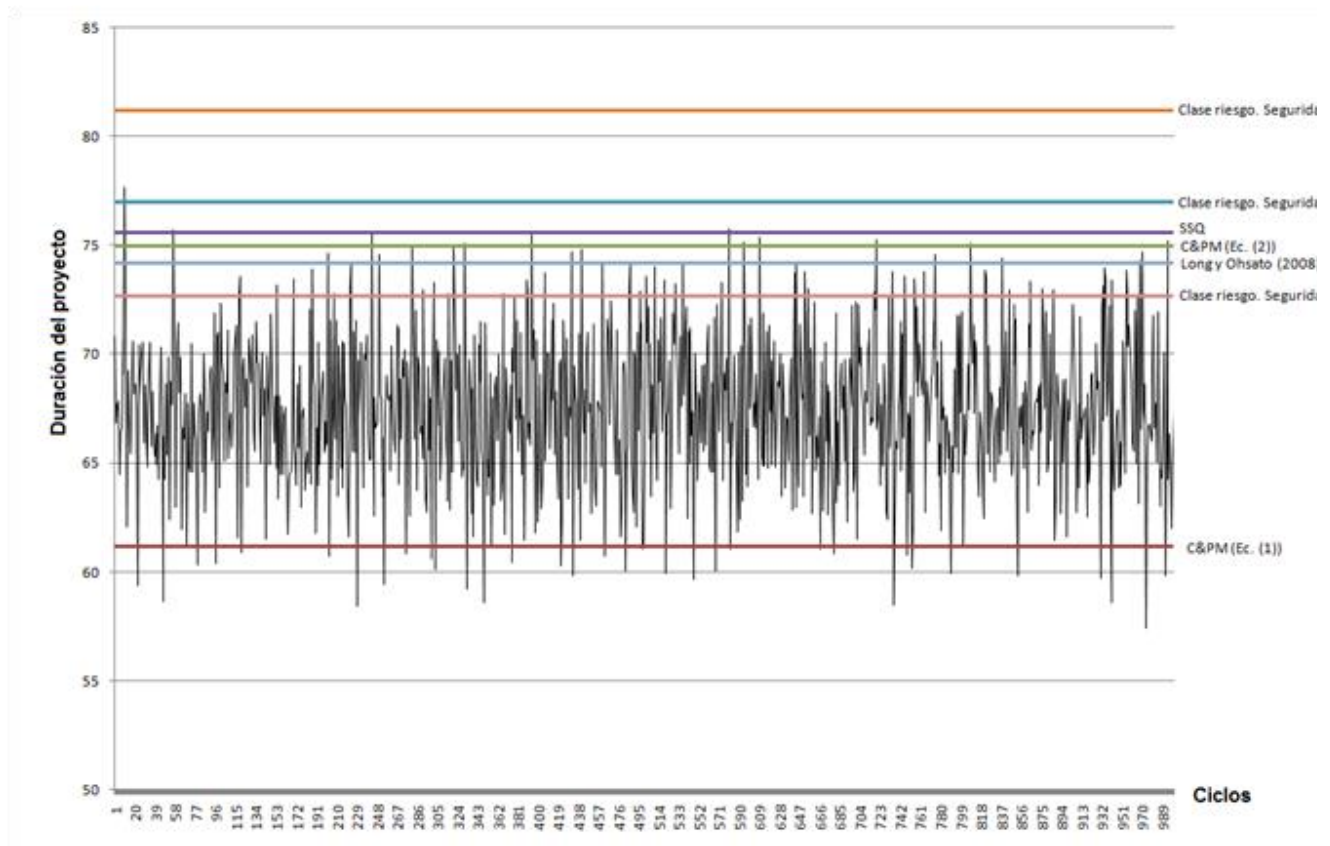


Fig. 8. Comparativa de la duración del proyecto con cada procedimiento de cálculo de búfers y la duración obtenida en la simulación Monte Carlo (Elaboración propia).

del procedimiento de Long y Ohsato (2008) genera resultados con un riesgo bajo.

En todos los procedimientos, la relación tamaño de búfer respecto de la cadena crítica (columna TB/D-CC (%) de la Tabla VI), excepto en el original propuesto por Goldratt, tienen porcentajes inferiores al 50%. Este resultado se debe a la poca variabilidad que presentan las actividades al tener una desviación estándar baja. Esto hace que la diferencia (Wi-Di) tenga un valor reducido en los procedimientos C&PM con la ecuación (2), SSQ y Long y Ohsato (2008), haciendo que el tamaño del búfer sea pequeño.

Relacionado con lo anterior, Bianchi (2013) señala que cuando en la cadena crítica existen actividades cuya duración está determinada con mucha precisión, su aporte al búfer debería ser nulo. Y, por el contrario, si existe alguna tarea cuya incertidumbre sea elevada, debería aumentarse la duración del búfer correspondiente.

Suponiendo que se cumplen las hipótesis en las que se basa el Teorema del Límite Central, si se utilizan las duraciones medias de las tareas, la duración total de la cadena resultante tendrá una probabilidad de cumplimiento del 50% (Navidi, 2006). Así, el búfer aumenta la probabilidad de cumplimiento al añadirle una reserva de tiempo adicional que tenga en cuenta la variabilidad y la incertidumbre en la ejecución de las tareas.

A pesar de lo anterior, hay que recordar que al aplicar el Teorema del Límite Central se presupone que las duraciones de las tareas se comportan como variables aleatorias independientes (Navidi, 2006). En el sector de los proyectos de construcción y edificación, debido a las interacciones que surgen entre las actividades durante la fase de ejecución, dicha hipótesis no se cumple totalmente.

## VII. CONCLUSIONES

El dimensionado de los búfers resulta un aspecto fundamental en la gestión de proyectos por CCPM. La elección adecuada del procedimiento de dimensionado no es sencilla debido a las variables que influyen sobre él, como son, entre otros, el tipo de proyecto, las características de las actividades, la información disponible, la incertidumbre asociada a la ejecución de las tareas y el ambiente en el que se desarrolla el proyecto, la formación y entrenamiento de los trabajadores o la disponibilidad de los materiales y equipos adecuados.

Un tamaño de búfer pequeño puede generar un riesgo importante, pues no protegería adecuadamente al plazo de finalización comprometido. Por el contrario, un tamaño excesivo, a pesar de proporcionar seguridad a la fecha de entrega, puede suponer una pérdida de competitividad para la empresa.

La duración total del proyecto está muy condicionada por la forma en la que se realice la estimación del tiempo de ejecución de las tareas, así como por el valor que se emplee en la

planificación. Utilizar duraciones de actividades inferiores a su estimación media hace que la probabilidad de cumplimiento de la fecha de finalización del proyecto sea baja, independientemente del tamaño del búfer.

Siempre que se disponga de información, se considera más adecuado planificar utilizando duraciones medias de las actividades que aplicar la Regla del 50% a la estimación más protectora o de bajo riesgo. Es muy importante poder disponer o calcular la distribución de frecuencias de las actividades, aunque sea de forma aproximada. Cuando existan actividades cuyo tiempo de ejecución sea un valor fijo, se ha de utilizar esa duración en la planificación.

Habrán proyectos en los que, por falta de datos, se tenga que recurrir a realizar estimaciones conservadoras y en los que tanto el procedimiento C&PM original propuesto por Goldratt como la Regla del 50% puedan ser de utilidad.

La probabilidad de cumplimiento del proyecto aumenta cuando se realiza la planificación utilizando las duraciones medias de las tareas. Adoptar este criterio al realizar el cronograma puede ser más importante, de cara a asegurar cumplir los plazos de entrega, que la elección del procedimiento de dimensionado del búfer.

La comparación realizada permite al gestor de proyectos elegir un procedimiento de dimensionado basado en la confiabilidad de la duración del proyecto. Cuando la aversión al riesgo sea elevada, el método de evaluación de clase de riesgo con seguridad media y alta genera un tamaño del proyecto similar o superior a la duración máxima obtenida con la simulación Monte Carlo.

A excepción del procedimiento C&PM con duraciones Wi (1), el resto de métodos de dimensionado proporcionan una confiabilidad superior al 90%.

En función de la dificultad de aplicación, se podrían clasificar de menor a mayor complejidad, C&PM con duraciones Di (2), SSQ, Evaluación de clase de riesgo y, finalmente, el método de Long y Ohsato (2008).

Además de elegir un procedimiento adecuado de dimensionado del búfer, la garantía de éxito de la planificación se apoya una herramienta fundamental de CCPM como es la gestión del búfer durante la ejecución. Aunque la estimación de la duración de las tareas y el cálculo del búfer sean elementos importantes, para tener cierto grado de seguridad de cara a alcanzar los objetivos del proyecto, éste se ha de gestionar empleando otros conceptos, técnicas y principios que dispone CCPM, basados en la Teoría de las Restricciones (TOC).

## REFERENCIAS

Bhushan, R. S., & Raghavan, V. S. (2013). A relative study on CCPM and LOB Scheduling Technique. *Indian Journal of Applied Research*, 3(5), 242-245.

- Bianchi, R. (2013). Cadena de esfuerzos eficientes: Cómo terminar los proyectos a tiempo y en presupuesto. Teoría de Restricciones para la gestión de proyectos. Edita: El autor.
- Bie, L., Cui, N., & Zhang, X. (2012). Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7343–7356.
- Chua, D. K. H., Shen, L. J., & Bok, S. H. (2003). Constraint-based planning with integrated production scheduler over internet. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(3), 293-301.
- Cook, S. C. (1998). Applying Critical Chain to improve the management of uncertainty in projects. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Correia, F., & Abreu, A. (2011). An overview of Critical Chain applied to Project Management. In *Recent Advances in Manufacturing Engineering*, 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, September (pp. 15-17).
- Elton, J., & Roe, J. (1998). Bringing discipline to Project Management. *Harvard Business Report*, 76(2), 153-159.
- Geekie, A., & Steyn, H. (2008). Buffer sizing for the critical chain project management method. *South African Journal of Industrial Engineering*, 19(1), 73-88.
- Goldratt, E. M. (2001). Cadena crítica. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- González, V., & Alarcón, L. F. (2003). Buffers de programación: Una estrategia complementaria para reducir la variabilidad en los procesos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18(2), 109-119.
- Hagemann, A. G. (2001). Use of the Critical Chain Project Management technique at NASA, Langley Research Center. In *Digital Avionics Systems*, 2001. DASC. 20th Conference (Vol. 1, pp. 4B1-1). IEEE.
- Hoel, K., & Taylor, S. G. (1999). Quantifying buffers for project schedules. *Production and Inventory Management Journal*, 40(2), 43-47.
- Horman, M. J., Messner, J. I., Riley, D. R., & Pulaski, M. H. (2003). Using buffers to manage production: A case study of the Pentagon renovation project. In *11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-11)*, Blacksburg, Virginia.
- Iglesias Sánchez, J. L. (2005). La programación de los proyectos y la “cadena crítica de un proyecto”. *Partida Doble*, (168), 88-103.
- Jan, S., & Ho, S. P. (2006). Construction project buffer management in scheduling planning and control. In *2006 Proceedings of the 23rd International Symposium on Robotics and Automation in Construction* (pp. 858-863).
- Khamooshi, H., & Cioffi, D. F. (2013). Uncertainty in task duration and cost estimates: fusion of probabilistic forecast and deterministic scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(5), 488-497.
- Kendall, G. I., Pitagorsky, G., & Hulett, D. (2001). Integrating Critical Chain and the PMBOK® Guide. International Institute for Learning, Inc (IIL), 1-21. Consultado el 9-8-17 en <http://tocinternational.com/pdf/IntegCCPMBOK.pdf>.
- Leach, L. P. (2014). *Critical chain project management*. 3rd edition. Boston: Artech House.
- Liu, J., & Whangbo, T. K. (2012). A study on the buffer sizing method of CCPM technique using statistical analysis. In *International Conference on Hybrid Information Technology* (pp. 672-679). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Long, L. D., & Ohsato, A. (2008). Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty. *International Journal of Project Management* 26(6), 688–698.
- Mattos, A. D., & Valderrama, F. (2014). *Métodos de planificación y control de obras. Del diagrama de barras al BIM*. Barcelona: Editorial Reverte.
- Medina, E. (2008). *Estructuras de hormigón armado. Edificación*. 2ª Ed. Las Rozas (Madrid): Delta, Publicaciones Universitarias.
- Mohamed, S., & Tucker, S. (1996). Options for applying BPR in the Australian construction industry. *International Journal of Project Management*, 14(6), 379, 385
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. México: McGraw-Hill.
- Newbold, R. C. (1998). *Project management in the fast lane. Applying the Theory of Constraints*. Boca Raton (FL): CRC-Press.
- Newbold, R. C. (2008). *The billion dollar solution. Secrets of Prochain Project Management*. ProChain Press.
- Park, M., & Peña-Mora, F. (2004). Reliability buffering for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(5), 626-637.
- Peng, W., & Huang, M. (2014). A critical chain project scheduling method based on a differential evolution algorithm. *International Journal of Production Research*, 52(13), 3940-3949.
- Rand, G. K. (2000). Critical chain: the theory of constraints applied to project management. *International Journal of Project Management*, 18(3), 173-177.
- Rezaie, K., Manouchehrabadi, B., & Shirkouhi, S. N. (2009). Duration estimation, a new approach in critical chain scheduling. In *Modelling & Simulation, 2009. AMS'09. Third Asia International Conference on* (pp. 481-484). IEEE.

- Sakamoto, M., Horman, M. J., & Thomas, H. R. (2002). A study of the relationship between buffers and performance in construction. In Proceedings Tenth Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Gramado, Brazil.
- Shou, Y., & Yeo, K. T. (2000). Estimation of project buffers in critical chain project management. In Management of Innovation and Technology, 2000. ICMIT 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. 162-167). IEEE.
- Slusarczyk, A., Kuchta, D., Verhulst, P., Huyghe, W., Lauryssen, K., & Debal, T. (2013). A comparison of buffer sizing techniques in the Critical Chain Method. Case study. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, 7(3), 43-56.
- Souza, F. B., & Moraes, A. A. C. (2016). Analysis of the application of critical chain project management in the product development process and portfolio management of an aircraft manufacturer. *Gestão & Produção*, 23(3), 473-485.
- Tenera, A. B. (2008). Critical chain buffer sizing: a comparative study. In Proceedings of PMI Research Conference, July 13 (Vol. 16), 1-12.
- Yang, J. (2007). How the critical chain scheduling method is working for construction. *Cost Engineering*, 49(4), 25-32.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.