01-009

#### REVIEW OF BUFFER'S SIZING METHODS IN CRITICAL CHAIN PROJECT MANAGEMENT

Fuentes Del Burgo, Joaquin<sup>(1)</sup>; Ruiz Fernández, Juan Pedro<sup>(1)</sup>; Valverde Gascueña, Nelia<sup>(1)</sup>; Navarro Astor, Elena<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidad de Castilla-La Mancha, <sup>(2)</sup>Universitat Politècnica de València

Buffers are fundamental elements to protect the programming in Critical Chain Project Management. Buffer's sizing has a significant impact on project's timeline. Based on the 50% Rule proposed by Dr. Goldratt and considering the criticism of the lack of justification of the method, other more scientific procedures have been developed. This paper identifies seven sizing methods obtained from an exhaustive bibliographic review. A practical application of these methods in the same project is presented, and comparisons of the results obtained are shown. Knowing the different methods for buffers' calculation, and depending on the number and accuracy of the data available for programming, the project manager will choose the most appropriate procedure according to project's size, cost and risk.

Keywords: Critical Chain; buffer; planning; Project management

### REVISIÓN DE MÉTODOS DE DIMENSIONADO DEL BUFFER EN EL MÉTODO DE LA CADENA CRÍTICA

En la dirección y gestión de proyectos con el método de la Cadena Crítica, los buffers son elementos fundamentales para proteger la programación. El dimensionado del buffer tiene un impacto significativo en el cronograma del proyecto. Partiendo de la Regla del 50% propuesta por el Dr. Goldratt y considerando las críticas a la falta de justificación del método, se han ido desarrollando otros procedimientos más científicos. Esta ponencia identifica siete métodos de dimensionado obtenidos de una revisión bibliográfica exhaustiva. Se presenta una aplicación práctica de dichos métodos en un mismo proyecto y se comparan los resultados obtenidos entre ellos y con la Regla del 50%. Conociendo los diferentes métodos de cálculo de los buffers y en función del número y precisión de los datos disponibles para realizar la programación, el director del proyecto escogerá el procedimiento que considere más oportuno de acuerdo a la envergadura, coste y riesgo del proyecto.

Palabras clave: Cadena crítica; buffer; planificación; gestión de proyectos

Correspondencia: Joaquín Fuentes del Burgo - joaquin.fuentes@uclm.es



#### 1. Introducción

La ejecución de las tareas de los proyectos, como en otros ambientes industriales, está afectada por fluctuaciones estadísticas. Estas fluctuaciones sólo pueden ser estimadas, dado que no se puede predecir su magnitud con exactitud (Newbold 1998). Con el fin de hacer previsiones realistas frente a la incertidumbre y la variabilidad, los planes del proyecto deben contener cierta cantidad de seguridad o contingencia, pero sin añadir contingencia innecesaria, ya que podría aumentar significativamente el tiempo y el dinero requeridos por el proyecto (Robinsons & Richards 2010).

En las metodologías tradicionales del *Project Management* no se aplican técnicas específicas para tener en cuenta la variabilidad de los procesos (González & Alarcón 2003). En la gestión de proyectos por el método de la Cadena Crítica (*Critical Chain Project Management* - CCPM), se emplean los buffers como una protección contra la incertidumbre en la duración de las tareas, desempeñando un papel fundamental en la planificación, programación y gestión de los proyectos (Kendall, Pitagorsky & Hulett 2001; Iglesias 2005; Bianchi 2013; Ma et al. 2014). Así, el concepto de buffer y su aplicación en la planificación de actividades se considera una innovación respecto al esquema tradicional de gestión del tiempo y una gran contribución al *Project Management* (Estellés et al. 2010).

En el método de la Cadena Crítica, un buffer generalmente suele ser un periodo de tiempo situado al final de una secuencia de tareas con el objetivo de proteger la programación de fluctuaciones asociadas a la ejecución de las actividades (Spundak, Fertalj & Kalpić 2008). El Dr. Goldratt propuso el uso de los buffers de proyecto y de alimentación en la programación del proyecto para mejorar la estabilidad de la cadena crítica y aumentar la probabilidad de conseguir la duración programada del proyecto (Tenera 2008).

Si los buffers están sobredimensionados, se añadirá una cantidad de coste y/o inversión anticipada o eventuales pérdidas de oportunidades de mercado. Al contrario, si los buffers están infradimensionados la probabilidad de sobrepasar el plazo estimado de ejecución puede aumentar, lo que supondrá penalizaciones financieras y pérdida de confianza del cliente o del mercado (Tenera, 2008).

Así, el correcto dimensionado y uso de los buffers resulta crucial para mejorar los resultados y, en última instancia, asegurar el éxito en la gestión del cronograma del proyecto (Ma et al. 2014). Según Yang (2007), decidir el tamaño de buffer adecuado resulta complicado, debe estar orientado al proyecto y varía de un caso a otro.

Para el cálculo de los buffers, el Dr. Goldratt (2001) propuso el uso de la Regla del 50%, pero debido a las críticas por la falta de justificación del método (Ashtiani et al. 2007; Stratton 2009) se han ido desarrollando otros procedimientos más científicos. Según Georgy, Marzook e Ibrahim (2013), todavía no hay consenso sobre el mejor método para estimar el tamaño de los buffers de proyecto y de alimentación.

A pesar de la importancia del dimensionado de los buffers, Bianchi (2013) señala que, para conseguir los objetivos del proyecto, la ejecución es más importante que la planificación. Las variaciones en el ambiente de los proyectos hacen que el director del proyecto tenga que identificar las desviaciones y solucionarlas para reconducir el proyecto (de Meyer, Loch & Pich 2002). Así, en CCPM, además de calcular y prever los buffers en el cronograma, durante la ejecución del proyecto se ha de realizar una gestión de los mismos con objeto de controlar las incertidumbres (Verhoef, 2013).

En esta ponencia se ha realizado una revisión bibliográfica que ha permitido seleccionar siete métodos de dimensionado de buffers de proyecto y de alimentación. Debido a su extensión, no se incluyen todos los procedimientos existentes. Desde hace unos años, se

vienen desarrollando nuevos procedimientos, algunos de ellos basados en la teoría de la lógica difusa (*Fuzzy Theory*) (Long & Ohsato 2008; Shi & Gong 2009; Zang, Jia & Díaz 2015).

En el apartado siguiente se resumen los procedimientos de dimensionado de los buffers. A continuación se describe la metodología empleada para realizar la simulación y comparar los resultados con la Regla del 50%. Seguidamente se presentan los resultados para finalizar con las conclusiones.

#### 2. Procedimientos de dimensionado de buffers

A modo de resumen, el método de la Cadena Crítica programa las tareas o actividades con dependencias del tipo fin-comienzo (*Finish-Start* - FS) en una programación lo más tarde posible (as late as possible – ALAP). Un margen de seguridad se agrega al finalizar el proyecto, donde actúa como una protección de la fecha de finalización, denominado buffer de proyecto (BP). Al final de las cadenas de tareas no críticas que se unen a la cadena crítica, se añade el buffer de alimentación (BA), cuyo fin es el de proteger las cadenas críticas contra las variaciones de las cadenas de alimentación (Tenera 2008).

### 2.1 La Regla del 50% (Cut and Paste Method – C&PM)

Realizando el cálculo de las duraciones de las tareas con estimaciones agresivas, el Dr. Goldratt (2001) propuso que el tamaño o duración de los buffers fuera el 50% de la duración de la cadena donde se colocaban. Leach (2014) define a este procedimiento "Regla del 50% de la cadena" o Método de Cortar y Pegar (*Cut and Paste Method* – C&PM) (Geekie y Steyn 2008).

El procedimiento a seguir consiste en estimar la duración de las tareas incluyendo la protección de forma individual, lo que se denomina también estimación o duración pesimista de la tarea (W<sub>i</sub>). Generalmente Wi es el tiempo para completar la actividad asignado con el método del camino crítico (Ashtiani et al. 2007). Se reduce la duración de cada actividad al 50%. Se añade al final de la cadena crítica o de alimentación toda la protección eliminada a las tareas. El tamaño del buffer (TB<sub>j</sub>) se obtiene reduciendo al 50% la protección total obtenida en el paso anterior.

$$TB_i = 50\% \cdot [\Sigma(50\% \cdot W_i)] \tag{1}$$

# 2.2 Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (Square Root of the Sum of the Squares - SSQ)

El método requiere estimar dos duraciones de las tareas. La primera estimación debería de ser la pesimista ( $W_i$ ), la cual incluye suficiente seguridad para proteger contra todas las posibles causas de retrasos. La segunda estimación ( $A_i$ ) debería ser aquella que no incluya dicha protección, asumiendo que las actividades serán realizadas con un máximo nivel de esfuerzo de los recursos, sin interrupciones impuestas por factores externos. La diferencia entre las dos estimaciones,  $D_i$ =  $W_i$  –  $A_i$ , se considera la magnitud que proporciona la variabilidad de la duración de la actividad. El tamaño del buffer se estima como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la variabilidad ( $D_i$ ) en las actividades individuales. Este método asume que las tareas del proyecto son totalmente independientes (Herroelen & Leus 2001; Bie, Cui & Zhang 2012; Leach 2014).

$$TB_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(D_i^2\right)} \tag{2}$$

En la fórmula (2) "n" es el número de tareas que forman la cadena crítica o la cadena de alimentación.

## 2.3 Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados más sesgo (*Bias plus SSQ*)

Este método combina la Regla del 50% y el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados utilizando una cantidad de buffer fija para tener en cuenta la variación, sumada con el segundo método para tener en cuenta la variación de causa común. La cantidad fija normalmente será significativamente menor que el 50% de la cadena (Leach 2014).

La Tabla 1 proporciona algunos criterios a usar en el cálculo de la cantidad fija del buffer a incluir en el proyecto o en el tiempo de alimentación. Las correcciones no se tienen que sumar necesariamente. Según Leach (2014), se debería emplear la experiencia para ajustar la protección por corrección del sesgo.

Tabla 1. Directrices para dimensionar la porción fija de los buffers (Fuente: Leach, 2014. Elaboración propia)

Causa del sesgo	Intervalo del tiempo del buffer				
Recurso de la tarea sucesora ocupado.	50%				
Omisiones.	Alguno, sin exceder el impacto de costos.				
Combinación de rutas (más de 5 rutas paralelas).	Más de 20%				
Errores.	5% - 20%				
Variación de causa especial.	0% - 30%				
No informar los reajustes necesarios.	0% - 20%				

### 2.4 Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error

Ashtiani et al. (2007) suponen una distribución lognormal para el tiempo de finalización de las tareas y proponen un nuevo análisis para determinar la escala y los parámetros de forma para cada actividad. Usando el método anterior, hacen una modificación al método de la raíz cuadrada del error y demuestran en su artículo que se sostiene la suposición 2σ.

Los pasos que hay que seguir para aplicar el nuevo algoritmo son los siguientes:

- Paso 1. Al igual que en el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, se estima la duración de cada actividad en el peor caso, W<sub>i</sub>.
- Paso 2. Obtener la duración media de las tareas de opiniones de expertos o de proyectos anteriores, M<sub>i</sub>.
- Paso 3. Determinar la desviación estándar de cada tarea con la expresión (3):

$$SD_{i} \approx (W_{i} - M_{i})/1,3 \tag{3}$$

 Paso 4. Suponiendo además que la suma de las distribuciones se distribuirá normalmente (esto es, aplicar el teorema del límite central), y usando un buffer que tiene una longitud de dos desviaciones estándar, el tamaño del buffer (TB<sub>j</sub>) para una cadena de "n" actividades puede obtenerse de la ecuación (4).

$$TB_{j} = 2.SD = 2.\sqrt{SD_{1}^{2} + SD_{2}^{2} + \dots + SD_{n}^{2}}$$
 (4)

#### 2.5 Procedimientos adaptativos de dimensionado del buffer: APD y APRT

Estos procedimientos parten de las premisas de que cuando el uso total de los recursos está cerca de su disponibilidad total, es más probable que se produzcan retrasos. Por lo tanto, los buffers deberían ser mayores para absorber los retrasos. Además, para un número dado de tareas, si el número de relaciones de precedencia aumenta vuelve a ser más probable que ocurran retrasos. En este caso, las tareas están más interrelacionadas y un retraso en la terminación de una tarea afectará a todas sus sucesoras. Por lo tanto, a medida que aumenta el número de relaciones de precedencia, el tamaño del buffer también debería aumentar (Tukel, Rom & Eksioglu 2006).

# 2.5.1 Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (*Adaptative Procedure with Resource Tightness* – APRT)

En este procedimiento r(i, q) el uso del recurso q en la actividad i (en unidades del recurso q);  $d_i$  es la duración de la actividad i (en unidades de tiempo); Rav(q) es la disponibilidad total del recurso q (en unidades del recurso q); T es la longitud de la cadena o ruta (en unidades de tiempo); VAR $_i$  es la varianza de la tarea i;  $\sigma_i$  es la desviación típica de la tarea i;  $\sigma_{Cadena}$  es la desviación típica o estándar de la cadena que alimenta al buffer.

La desviación típica de la cadena que alimenta al buffer se obtiene como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones típicas de las tareas que pertenecen a dicha cadena.

$$\sigma_{Cadena} = \sqrt{\sum VAR_i} = \sqrt{\sum \sigma_i^2}$$
 (5)

Para cada cadena de alimentación y para cada recurso empleado en las tareas que pertenecen a esa cadena, se debe calcular el valor de RT(q), factor de utilización del recurso q, coeficiente que informa de la disponibilidad del recurso q (*Resource Tightness* - RT), proporcionando un valor comprendido entre 0 y 1. Para cada recurso de tipo q empleado en las tareas de la cadena (Vanhoucke, 2006):

$$RT(q) = \frac{\text{Uso total del recurso q}}{\text{Disponibilidad total del recurso q}} = \frac{\sum_{i} r(i, q) \cdot d_{i}}{T \cdot Rav(q)}$$
 (6)

Para todos los recursos empleados en las tareas de la cadena, se obtiene el valor de r' que corresponde al mayor valor calculado de RT(q).

$$r' = MAX_{q} \{RT(q)\}$$
 (7)

El factor de escala K basado en la escasez de recurso viene dado por la siguiente expresión:

$$K=1+r'$$
 (8)

La expresión que proporciona el tamaño del buffer situado al final de la cadena viene dada por:

$$TB = K \cdot \sigma_{Cadena}$$
 (9)

# 2.5.2 Procedimiento adaptativo con densidad (*Adaptative Procedure with Density* – APD)

La densidad de la red de una cadena que alimenta a un buffer es una medida de cómo de densa es la red en términos del número de actividades y relaciones de precedencia entre esas actividades (Tukel, Rom & Eksioglu 2006).

Sea TOTPRE el número total de relaciones de precedencia definidas en la cadena y NUMTASK el número total de tareas en la cadena, VAR<sub>i</sub> se define como en el apartado anterior, la varianza de la tarea i (Tukel, Rom & Eksioglu 2006).

La densidad de red usada en el procedimiento APD es igual al número de relaciones de precedencia (TOTPRE) dividido por el número de actividades de la cadena (NUMTASK). El valor de la densidad se conoce también como coeficiente de complejidad de la red (*Coefficient of Network Complexity* – CNC) (Vanhoucke 2006).

$$CNC = TOTPRE/NUMTASK$$
 (10)

Entonces para cada cadena de alimentación, el factor de escala basado en la densidad de la cadena:

$$K = 1 + CNC = 1 + (TOTPRE/NUMTASK)$$
 (11)

La expresión que proporciona el tamaño del buffer situado al final de la cadena de tareas viene dado por la expresión (9), donde la desviación típica de la cadena que alimenta al buffer se obtiene con la expresión (5).

# 2.6 Procedimiento adaptativo con dependencia de la actividad (*Adaptive Procedure with Activity Dependence* - APAD)

En los métodos de dimensionamiento del buffer anteriores se supone que todas las actividades del proyecto son independientes entre sí. Sin embargo, los efectos del intercambio de recursos y los factores de riesgo ambientales comunes en algunas actividades hacen que el supuesto de independencia sea poco realista (Bie, Cui & Zhang 2012). La duración de las actividades relacionadas con el riesgo tenderá a variar juntas, de modo que la incertidumbre sobre la duración del proyecto aumenta. Así, al determinar el tamaño del buffer, se debe considerar el efecto de la dependencia entre las duraciones de la actividad en la duración del proyecto (Bie, Cui & Zhang 2012).

Bie, Cui y Zhang (2012) suponen que sólo hay un factor de riesgo en el proyecto. Después de determinar la programación de la cadena crítica del proyecto, es fundamental estimar el número de actividades relacionadas con el riesgo en cada cadena. A continuación, se evalúa el nivel del parámetro de dependencia para cada actividad. Además, siguiendo la sugerencia de Newbold (1998), estiman que los tamaños del buffer con el supuesto de la independencia entre actividades se determinan utilizando dos desviaciones estándar.

Las dos características que reflejan la dependencia de un proyecto son el grado de dependencia (DD) y el factor de dependencia (DF). El grado de dependencia (DD) se calcula como la relación entre el número de actividades relacionadas con el riesgo y el número total de actividades en la cadena crítica o la ruta más larga de cada cadena de alimentación. El factor de dependencia (DF) se obtiene como el nivel promedio del parámetro de dependencia, que se determina al calcular la proporción de incertidumbre de duración de una actividad explicada por el factor de riesgo.

Para cada cadena (crítica o de alimentación), N es el número total de actividades en dicha cadena, M es el número de actividades afectadas por el factor de riesgo en la cadena, K<sub>i</sub> es el porcentaje de incertidumbre de duración de la actividad i explicada por el factor de riesgo, VAR<sub>i</sub> es la varianza de la actividad i de la cadena. Entonces el tamaño del buffer de proyecto o del buffer de alimentación (TB) puede ser calculado como sigue:

$$DD = M/N \tag{12}$$

$$DF = \left(\sum_{i} K_{i}\right) / M \tag{13}$$

$$r = DD \cdot \left( \exp(DF^2) - 1 \right) \tag{14}$$

$$TB = (1+r) \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\sum_{i} VAR_{i}}\right) \tag{15}$$

# 2.7 Dimensionamiento del buffer basado en la incertidumbre de las actividades del proyecto

En general, los riesgos con influencia en el cronograma del proyecto se refieren a los factores que afectan negativamente el proyecto. Estos riesgos pueden retrasar la duración de la actividad o incluso cancelar una tarea, con consecuencias en la implementación del proyecto (Zhang, Jia & Díaz 2015).

La lógica difusa es más adecuada para aquellas condiciones en las que el proyecto carece de datos históricos o es diferente de proyectos anteriores. En estas circunstancias, la determinación de la distribución de probabilidad de la actividad del proyecto es poco realista e inexacta y, por lo tanto, es más dependiente del juicio subjetivo. La lógica difusa puede cuantificar las incertidumbres y, por lo tanto, es más razonable y aplicable para estimar la incertidumbre de las actividades (Zhang, Jia & Díaz 2015).

La estimación de la incertidumbre está relacionada con la experiencia de los expertos. Una forma de intervalo es más adecuada para eliminar los problemas la incertidumbre. Zhang, Jia y Díaz (2015) proponen en su método un conjunto difuso trapezoidal A(i)=[a(i), b(i), c(i), d(i)] para estimar la incertidumbre de las actividades (Figura 1). Los valores a(i), b(i), c(i) y d(i) serían el conjunto difuso de la incertidumbre de la actividad.

El índice de acuerdo (*Agreement Index* – Al) es un índice que se usa para establecer la consistencia de dos eventos difusos y mide el grado de acuerdo. El valor de Al está entre 0 y 1 y dos eventos son compatibles cuando Al= 1. De acuerdo con la Figura 1, el área de color amarillo muestra el solapamiento del evento (A) con el evento (B). El valor de Al puede determinarse con la ecuación (16) que adopta el método de cálculo de la tasa de área.

$$AI(A,B) = S(A \cap B)/S(A) \tag{16}$$

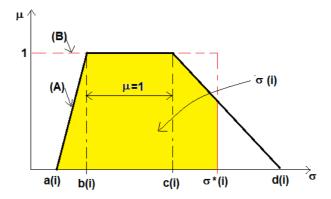
Donde

$$S(A \cap B) = [c(i) - b(i) + d(i) - a(i)]/2 - [d(i) - \sigma(i)]^2 / (2 \cdot [d(i) - c(i)])$$

$$S(A) = [c(i) - b(i) + d(i) - a(i)]/2$$
(18)

Generalmente, para conseguir una estimación con resultados cercanos a la realidad, el valor de AI debe ser elevado, normalmente los planificadores buscan un valor AI= 90%. Para este valor, la incertidumbre de la actividad  $\sigma(i)$  puede calcularse con las expresiones (16) a (18). A modo de ejemplo, Zhang, Jia y Díaz (2015) señalan una actividad cuya duración media es de 10 días, con una incertidumbre dada por el conjunto difuso A(i)=(1, 3, 4, 6), obteniendo un valor de  $\sigma(i)$ = 4,9.

Figura 1: Números difusos trapezoidales (Fuente: Zhang, Jia & Díaz 2015 .Elaboración propia)



El ratio de utilización de recursos de las actividades del proyecto viene dado por la ecuación (6). Para cada actividad i se ha de calcular la escasez de recursos  $\alpha(i)$  con la expresión (19) teniendo en cuenta el valor RT(q) de los recursos que participan en la actividad i, así como los empleados en las tareas de la cadena.

$$\alpha(i) = MAX_{a} \left\{ RT(q) \right\} \tag{19}$$

Zhang, Jia y Díaz (2015) realizan la red del proyecto situando las actividades en los nudos y las precedencias en las flechas. La complejidad de la red de la actividad i se determina con la ecuación (20), donde  $N_{\rm Y}$  representa el número total de precedencias definidas en la subred que alimenta a la actividad i de la cadena y  $N_{\rm X}$  es el número total de nudos de la subred.

$$\beta(i) = 1 + N_Y/N_X$$
 (20)

En este método se estima inicialmente la incertidumbre difusa de las actividades de la cadena crítica y luego se usa para ajustar las incertidumbres de las actividades de acuerdo con la escasez de recursos y la complejidad de la red.

Finalmente, el cálculo del buffer de proyecto se realiza con la ecuación (21):

$$TB = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left[ (1 + \alpha(i)) \cdot \beta(i) \cdot \sigma(i) \right]^2}$$
 (21)

### 3. Metodología

Para comparar los buffers obtenidos con los métodos descritos en el apartado anterior se aplicarán a la red de un único proyecto ejemplo, cuyos datos se resumen en la Tabla 2. Se dispone de un solo recurso R1, dos recursos R2 y otro R3. La columna  $d_{min}$  es la duración mínima de las actividades con una probabilidad de 0,05 (aproximadamente  $2 \cdot \sigma$ ).La última columna corresponde a la incertidumbre de la duración de cada actividad proporcionada con conjuntos difusos de distribución trapezoidal (*Trapezoidal Fuzzy Numbers* - TrFN) (Long & Ohsato 2008; Zhang, Jia & Díaz 2015).

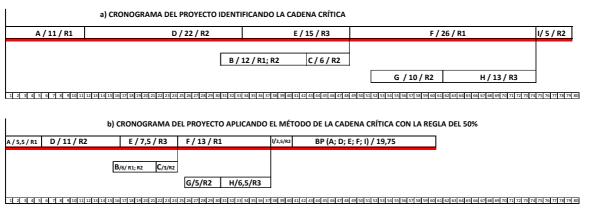
Siguiendo la propuesta de Newbold (1998), la duración de las actividades sigue una distribución lognormal de media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ , con una duración pesimista Wi que corresponde a un nivel de confianza del 90% de la estimación.

Se construye la red en la que la cadena crítica está formada por la secuencia de tareas A, D, E, F e I. Las cadenas de alimentación serán dos. La formada por las tareas B y C, que conecta con la cadena crítica antes de la tarea F; y la cadena formada por las tareas G y H, que conecta con la cadena crítica antes de la tarea I, siguiendo la premisa de realizar una programación ALAP. En la Figura 2 se puede comprobar que no existe incompatibilidad con el número de recursos disponibles. El cronograma inicial se ha realizado con las duraciones W<sub>i</sub> y, posteriormente, siguiendo la condición establecida por Goldratt (2001), se ha reducido la duración al 50% y se han colocado los buffers al final de las cadenas (crítica y de alimentación) calculándolos con la Regla del 50%.

Actividad	Precedente	Recurso	μ	σ	Wi	$d_{min}$	TrFN (a(i), b(i), c(i), d(i))
Α	-	R1	9	2	11	5,7	(1, 2, 3, 6)
В	Α	R1; R2	10	2	12	6,7	(1, 2, 3, 5)
С	В	R2	5	1	6	3,4	(0, 1, 2, 3)
D	Α	R2	20	2	22	16,7	(0, 1, 2, 4)
Е	D	R3	12	3	15	7,1	(2, 3, 4, 6)
F	C,E	R1	23	3	26	18,1	(1, 2, 3, 6)
G	D	R2	8	2	10	4,7	(1, 2, 3, 5)
Н	G	R3	10	3	13	5,1	(2, 3, 4, 7)
I	F, H	R2	4	1	5	2,4	(0, 1, 2, 3)

Tabla 2. Actividades y datos del proyecto

Figura 2: Cronograma del proyecto identificando la cadena crítica (a) y aplicando la Regla del 50% (b).



Nota: BP: Buffer de proyecto. BA: Buffer de alimentación.

Para realizar la comparación entre los métodos de dimensionado de los buffers se realizará una simulación Monte Carlo. Esta técnica de simulación ha sido empleada, entre otras aplicaciones, para analizar la probabilidad de completar los proyectos (Hoel & Taylor 1999).

Se empleará el programa Excel<sup>®</sup>, al ser una herramienta que proporciona una gran flexibilidad y capacidad estadística en el uso de la simulación Monte Carlo. Se generarán números aleatorios entre 0 y 1 con la función =ALEATORIO() (Azofeifa 2004). Para obtener la duración de cada actividad de forma aleatoria, según una distribución lognormal, se utilizará la función =LN(DISTR.LOG.INV(ALEATORIO(); media; desv\_estándar)) estableciendo como condición que esta duración no sea inferior a la duración mínima (d<sub>min</sub>) de cada actividad.

En el cálculo del buffer por el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados más sesgo, se considerará un sesgo por variación de causa especial variable de 0% al 30% del tiempo de la cadena que alimenta al buffer. El porcentaje se calculará de forma aleatoria con la expresión =ALEATORIO()\*0,3. Para proporcionar variabilidad al valor de  $\sigma(i)$  de la ecuación (21), éste se calcula asignando un índice de acuerdo Al variable entre 0,85 y 0,95. Esto se consigue calculando el valor de  $\sigma(i)$  con un valor de Al generado aleatoriamente con la función =ALEATORIO.ENTRE(85;95)/100.

La duración del proyecto se calcula para un número de 1.000 ciclos (Mattos & Valderrama 2014). Las duraciones de cada ciclo serán las mismas en el cálculo de los buffers de cada método de dimensionado. Para cada ciclo se calculan las duraciones de la cadena crítica y se determina el tamaño del buffer correspondiente.

En la utilidad del programa Excel<sup>®</sup> "Análisis de datos", se emplea la herramienta *Estadística descriptiva* para obtener un informe estadístico de la variable elegida (duración del proyecto y tamaño del buffer de proyecto) para los 1.000 datos del rango de entrada (Azofeifa 2004).

### 4. Resultados y discusión

Con el fin de obtener una conclusión objetiva, la Tabla 3 muestra, para cada procedimiento, la comparación del valor medio de la duración del proyecto, así como la duración del buffer de proyecto con los valores obtenidos aplicando la Regla del 50%. La Figura 3 muestra los diagramas de barras con el tamaño medio de los buffers de proyecto y la duración media de los proyectos obtenidos en la simulación Monte Carlo.

Tabla 3. Comparación de resultados realizando la simulación Monte Carlo

Método	Media del buffer del proyecto (BP) (días)	Comparación con el tamaño del buffer obtenido con la Regla 50%	Media de la duración del proyecto (días)	Comparación con la duración del proyecto obtenido con la Regla 50%
Regla del 50%	19,8	100%	59,3	100%
SSQ	6,8	34%	40,9	69%
Bias plus SSQ	11,8	60%	45,9	78%
Método de Ashtiani et al. (2007)	10,4	53%	44,6	75%
APRT	10,0	50%	44,1	74%
APD	12,2	62%	46,3	78%
APAD	12,2	71%	48,2	81%
Método de Zhang, Jia y Díaz	15,0	76%	49,1	83%

En todos los procedimientos se obtiene una duración media del buffer de proyecto inferior al que se obtiene con el método de la Regla del 50%. El buffer de menor tamaño es el que se obtiene con el procedimiento de SSQ. El resultado obtenido con los procedimientos de la raíz cuadrada del error más sesgo (Bias plus SQQ) y APD muestra buffers similar tamaño. Los métodos de APRT y Ashtiani et al. (2007) proporcionan tamaños de buffer intermedios. Finalmente, los métodos APAD y el de Zhang, Jia y Díaz (2015) generan un tamaño de buffer superior al del resto de los métodos, a excepción de la Regla del 50%.

Las ventajas del método de la Regla del 50% son su simplicidad y sencillez, así como la de asegurar un tamaño de buffer relativamente grande (Spundak, Fertalj & Kalpić 2008; Bie, Cui & Zhang 2012). El principal inconveniente, tal y como muestra la comparativa, es que al ser un procedimiento lineal, el tamaño del buffer aumenta linealmente con el tamaño de la

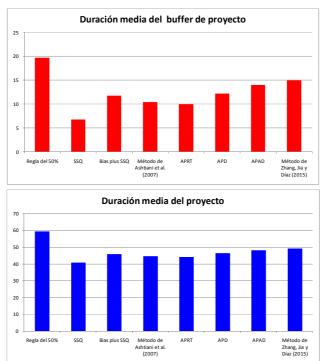
secuencia de las tareas que protege, añadiendo una protección relativamente grande y proporcionando un buffer impracticable en proyectos de larga duración (Ma et al. 2014).

El método SSQ permite explicar la variación conocida en la duración de la tarea pero su desventaja es que puede conducir a buffers de tamaño inferior para cadenas largas (Geekie & Steyn 2008). En comparación con el método de la Regla del 50% no genera tamaños de buffer muy grandes dependiendo de la longitud de la cadena de alimentación (Tukel, Rom & Eksioglu 2006). En comparación con el resto de métodos es el que proporciona el tamaño del buffer más pequeño.

El método SSQ más sesgo suple la posible desventaja del método SSQ en el tamaño de los buffers, pero queda abierto a la subjetividad y/o a la experiencia del programador al escoger el porcentaje que se aplica en la corrección.

El método propuesto por Asthiani et al. (2007), basado en SSQ, proporciona un tamaño de buffer superior al del SSQ en más de un 50%, lo que podría suponer una mejora con respecto al método original.

Figura 3: Gráficos de barras con la comparación de los valores medios del tamaño del buffer de proyecto y de la duración media del proyecto tras la simulación Monte Carlo.



Los procedimientos adaptativos APRT, APD proporcionan tamaños de buffer intermedios, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos y la complejidad de la red. Según Tukel, Rom y Eksioglu (2006), estos métodos ofrecen protección suficiente contra los retrasos en el tiempo de finalización del proyecto.

El procedimiento APAD genera un buffer de proyecto mayor al del resto de procedimientos adaptativos. Una mejora de este método es que tiene en cuenta la dependencia entre las actividades. Esto puede suponer mejorar protección a la fecha de finalización del proyecto (Bie, Cui & Zhang 2012).

Finalmente, el propuesto por Zhang, Jia y Díaz (2015) presenta la ventaja de poder hacer un cálculo del tamaño de buffers en proyectos nuevos de los que se disponga de poca información. Como inconveniente, resulta necesario contar con la experiencia de expertos a

la hora de obtener los conjuntos de números difusos que permitan cuantificar la incertidumbre de las actividades.

La clasificación de los procedimientos de menor a mayor dificultad de aplicación sería: Regla del 50%, SSQ, SSQ más sesgo, método de Ashtiani et al. (2007), APRT, APD, APAD y el método de Zhang, Jia y Díaz (2015).

Newbold (1998) recuerda que los buffers son un tiempo agregado al riesgo encontrado a lo largo de la cadena de eventos que lo alimentan. Para su estimación se pueden hacer cálculos con un elevado grado de detalle, pero afirma que este trabajo no vale la pena si los datos empleados no son lo suficientemente buenos como para aportar precisión.

#### 5. Conclusiones

La descripción de los métodos de dimensionado de buffers y la aplicación realizada aporta criterios de elección del método en función de la dificultad de uso o del tamaño del buffer resultante.

Otro criterio de elección del procedimiento de cálculo ha de ser la cantidad y calidad de la información disponible para realizar la estimación del tiempo de las tareas. No tiene sentido utilizar procedimientos complejos si la información disponible es insuficiente o subjetiva.

Si el riesgo asociado al proyecto es elevado, los métodos que pueden proporcionar mayor seguridad en el tamaño del buffer serían el APAD y el propuesto por Zhang, Jia y Díaz (2015).

Cualquiera de los métodos estudiados presentan como ventaja la posibilidad de implementarlos en una hoja de cálculo, sin necesidad de emplear ningún programa informático especializado, aunque eso no significa que no se recomiende su empleo, siempre y cuando permita la incorporación del método que se considere oportuno.

Independientemente del método de dimensionado de buffer a emplear, hay que subrayar que será la gestión adecuada de los buffers durante la ejecución del proyecto la que ayudará a la consecución de sus objetivos.

#### 6. Referencias

- Ashtiani, B. Jalali, G. R., Aryanezhad, M. B. & Makui, A. (2007). A new approach for buffer sizing in critical chain scheduling. En *Industrial Engineering and Engineering Management*, 2007 IEEE International Conference on (1037-1041). IEEE.
- Azofeifa, C. E. (2004). Aplicación de la Simulación Monte Carlo en el cálculo del riesgo usando Excel. *Tecnología en Marcha*, *17*, 97-109.
- Bianchi, R. (2013). Cadena de esfuerzos eficientes: Cómo terminar los proyectos a tiempo y en presupuesto. Teoría de Restricciones para la gestión de proyectos. Montevideo: 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*, 7343–7356.
- de Meyer, A.; Loch, C.H. & Pich, M.T. (2002). Managing project uncertainty: From variation to chaos. *MIT Sloan Management Review*, *43*, 60-67.
- Estellés Miguel, S., Barbera Ribera, T., Albarracín Guillem, J. M. & Dema Pérez, C. M. (2010). Revision to Theory of Constraints. En *Balanced Automation Systems for Future Manufacturing Networks* (193-201). Springer Berlin Heidelberg.
- Geekie, A. & Steyn, H. (2008). Buffer sizing for the critical chain project management method. South African Journal of Industrial Engineering, 19, 73-88.

- Georgy, M. E., Marzook, A. A. & Ibrahim, M. E. (2013). Applicability of critical chain scheduling in construction projects: an investigation in the Middle East. En *The 19th Cib World Building Congress*. Queensland University of Technology.
- 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*, 109-119.
- Herroelen, W. & Leus, R. (2001). On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. *Journal of Operations Management*, 19, 559-577.
- Hoel, K. & Taylor, S. G. (1999). Quantifying buffers for project schedules. Production and Inventory Management Journal, 40, 43-47.
- Iglesias Sánchez, J. L. (2005). La programación de los proyectos y la "cadena crítica de un proyecto". *Partida Doble*, (168), 88-103.
- Kendall, G. I., Pitagorsky, G. & Hulett, D. (2001). Integrating Critical Chain and the PMBOK® Guide. *International Institute for Learning, Inc (IIL)*, 1-21. Disponible en: http://tocinternational.com/pdf/IntegCCPMBOK.pdf.
- Leach, L. P. (2014). Critical Chain Project Management (3rd Ed). Boston: Artech House.
- Long, L. D. & Ohsato, A. (2008). Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty. *International Journal of Project Management*, 26, 688-698.
- Ma, G., Wang, A., Li, N., Gu, L. & Ai, Q. (2014). Improved Critical Chain Project Management framework for scheduling construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140, 04014055 1-12.
- Mattos, A. D. & Valderrama, F. (2014). *Métodos de planificación y control de obras. Del diagrama de barras al BIM.* Barcelona: Editorial Reverte.
- Newbold, R. C. (1998). *Project management in the fast lane*. Boca Raton, FL, EUA: St. Lucie Press.
- Robinson, H. & Richards, R. (2010). Critical Chain Project Management: Motivation & Overview. En *Aerospace Conference*, 2010 IEEE (1-10). IEEE.
- Shi, Q. & Gong, T. (2009). An improved project buffer sizing approach to critical chain management under resources constraints and fuzzy uncertainty. En International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence 2009. AICI'09. International Conference on (Vol. 1, 486-490). IEEE.
- Špundak, M., Fertalj, K. & Kalpić. D. (2008). Is Critical Chain Project Management really a novel technique? En B. Miroslav & R. Kornelije (Ed.) *Proceedings of the 19th Central European Conference on Information and Intelligent System* (227-234). Varaždin: Faculty of Organization and Informatics University of Zagreb.
- Stratton, R. (2009). Critical chain project management theory and practice. *Journal of Project Management and Systems Engineering*, 21, 149-173.
- Tenera, A. B. (2008). Critical chain buffer sizing: a comparative study. En *Proceedings of PMI Research Conference, (Vol. 16).*
- Tukel, O. I., Rom, W. O. & Eksioglu, S. D. (2006). An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. *European Journal of Operational Research*, 172, 401–416.
- Vanhoucke, M. (2006). Integrated project management sourcebook. A technical guide to project scheduling, risk and control. London: Springer.
- Verhoef, M. (2013). *Critical Chain Project Management*. MPM thesis, University of Applied Sciences, Utrecht, The Netherlands.
- Yang, J. (2007). How the Critical Chain scheduling method is working for construction. *Cost Engineering*, 49, 25-32.
- Zhang, J., Jia, S. & Díaz, E. (2015). A new buffer sizing approach based on the uncertainty of project activities. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 23, 3-12.