

(01-008) - APPLICATION OF TOOLS AND TECHNIQUES TO DETERMINE TASK DURATION AND BUFFERS IN THE CRITICAL CHAIN METHOD

Serrano Gomez, Luis ¹; Fernández Guillamón, Ana ¹; García Cascales, María Socorro ²

¹ UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA, ² Universidad Politécnica de Cartagena

The Critical Chain Project Management (CCPM) method is widely used in Project Management to address resource constraints and the uncertainty that may arise when developing a project schedule.

To achieve this, the method employs buffers, which absorb delays that activities in the project may experience during their execution.

This article proposes a methodology for determining the duration of tasks and buffers in a project by combining various tools and techniques commonly used in Project Management. These include expert judgment, estimating task duration through three values (analysing the best alternative based on project maturity), the Delphi methodology for collecting expert panel opinions on task duration, and Monte Carlo simulation to optimize task durations and project buffers.

Keywords: Critical Chain Project Management Method; Monte Carlo; Buffers; Delphi Methodology

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS PARA DETERMINAR LA DURACIÓN DE TAREAS Y BUFFERS EN EL MÉTODO DE LA CADENA CRÍTICA

El método de la cadena crítica (CCM) es un método ampliamente utilizado en la Dirección de Proyectos para tener en cuenta la limitación de recursos y la incertidumbre que puede surgir a la hora de desarrollar el cronograma de un proyecto.

Para ello, este método utiliza colchones/amortiguadores (buffers), que absorben los retrasos que podrían sufrir las actividades del proyecto durante su ejecución.

Este artículo plantea una metodología para la determinación de la duración de las tareas y buffers de un proyecto combinando varias herramientas y técnicas usuales en la Dirección de Proyectos, incluyendo el juicio de expertos, la estimación de la duración por tres valores (analizando la mejor alternativa en función de la madurez del proyecto), la metodología Delphi para la recopilación de las opiniones del panel de expertos sobre la duración de las tareas y simulación Monte Carlo para optimizar las duraciones de las tareas y los buffers del proyecto.

Palabras clave: Método Cadena Crítica; Monte Carlo; Buffers; Método Delphi.

Correspondencia: Luis Serrano Gómez. Luis.Serrano@uclm.es



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El método de la cadena crítica (CCM) es un método ampliamente utilizado en la Dirección de Proyectos para gestionar la limitación de recursos y la incertidumbre que puede surgir a la hora de desarrollar el cronograma de un proyecto. Para ello, el método CCM utiliza colchones/amortiguadores (buffers), que son los encargados de absorber los retrasos que podrían sufrir las actividades del proyecto durante su ejecución (Ghaffari & Emsley, 2015).

Este artículo plantea una metodología para la determinación de la duración de las tareas y buffers de un proyecto, combinando varias herramientas y técnicas usuales en la Dirección de Proyectos (IPMA, 2015). Las herramientas consideradas son el juicio de expertos, la estimación de la duración por tres valores (analizando la mejor alternativa en función de la madurez del proyecto), la metodología Delphi para la recopilación de las opiniones del panel de expertos sobre la duración de las tareas y simulación Monte Carlo para optimizar las duraciones de las tareas y los buffers del proyecto.

Esta metodología se aplica a una planta solar fotovoltaica de 50 MW de potencia nominal, ubicada en la provincia de Badajoz (España).

2. Propuesta de modelo para la determinación de la duración de tareas y buffers

Se propone un modelo para determinar la duración de las tareas y buffers de un proyecto, utilizando varias de las herramientas y técnicas ampliamente utilizadas en Dirección de proyectos como son el Método Delphi y el Juicio de Expertos.

El modelo se compone de cinco etapas:

1. Establecer un panel de expertos.
2. Estimar la duración de las tareas aplicando el método PERT (Program Evaluation and Review Technique –Técnica de evaluación y revisión de programas).
3. Recopilar las opiniones del panel de expertos sobre la duración de las tareas.
4. Determinar la duración del buffer de proyecto y de los buffers de alimentación aplicando el método de Goldratt o del 50% y el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados.
5. Aplicar simulación Monte Carlo para determinar la duración del proyecto y el tamaño de los buffers.

2.1. Establecer un panel de expertos

De cara a la composición del panel de expertos, de acuerdo con Jinrong & Enyi (2011), sus componentes deben elegirse entre aquellos que cumplan con los siguientes requisitos mínimos.

- Poseer un alto grado de conocimiento y experiencia previa en proyectos similares al que se va a realizar. En este caso, de energías renovables.
- Poseer un alto grado de conocimiento y experiencia en gestión y dirección de proyectos.
- Que, en su conjunto, cubran el mayor ámbito posible de áreas del proyecto. Para ello, el panel deberá incluir perfiles profesionales como los siguientes: jefes de proyecto, miembros de equipos de desarrollo de proyectos, promotores y/o expertos en la materia procedentes de fuera del equipo del proyecto o las partes interesadas.

2.2. Estimar la duración de las tareas aplicando el método PERT

El método PERT es un método ampliamente utilizado para planificar proyectos en los que es necesario coordinar un gran número de actividades. Además, este método permite

representar gráficamente las diferentes actividades que componen el proyecto y calcular los tiempos de ejecución de las tareas que lo componen. Para ello, la aplicación del método se puede resumir en cuatro etapas:

1. Listar las actividades o tareas que son necesarias para poder llevar el proyecto a buen término.
2. Establecer las relaciones de precedencia entre las actividades, es decir, para cada actividad se establece qué actividades deben precederla. En el método PERT, todas las relaciones de precedencia son "Fin a Comienzo" (FC)
3. Representar el grafo del proyecto. Para la representación gráfica de las tareas y sus relaciones de precedencia, se deben cumplir tres reglas:
 - Un nudo sólo puede numerarse una vez que se han numerado todos los nudos que le preceden.
 - Debe haber un único nudo de comienzo y un único nudo de final.
 - Dos flechas que parten del mismo nudo no pueden tener el mismo nudo de destino.
4. Calcular las duraciones. El grafo PERT se utiliza para calcular la duración del proyecto y para evaluar la importancia de las diferentes tareas:
 - Tiempo "early" = tiempo mínimo necesario para alcanzar un nudo.
 - Tiempo "last" = tiempo máximo en alcanzar un nudo sin que el proyecto sufra un retraso.

Las duraciones previstas de las tareas están establecidas de manera individual. Los tiempos early y last dependen de la relación entre las diferentes tareas, y se determinan a partir del grafo PERT. De dicho proceso, se determina que existe "holgura" en un nudo cuando el tiempo early es inferior al tiempo last. El que exista holgura en una determinada tarea implica que puede ejecutarse con un cierto retraso sin que la duración total del proyecto se vea comprometida. Si en un determinado nudo, el tiempo early es igual al tiempo last, no existe holgura. El "camino crítico" es la senda definida por los nudos que no tienen holgura. Este camino es importante porque indica todas las actividades en las que no debe haber ningún retraso.

2.3. Recopilar las opiniones del panel de expertos sobre la duración de las tareas

Los miembros del grupo de expertos son necesarios para establecer la duración de las tareas. De acuerdo con la Guía del PMBOK® (Project Management Institute, 2017), para tener en cuenta la incertidumbre y el riesgo en la estimación de la duración, el método PERT utiliza tres estimaciones para definir un rango aproximado de duración de una actividad:

- Tiempo optimista (T_o) = estimación de tiempo más corta (mejor valor del histórico).
- Tiempo pesimista (T_p) = estimación más larga (peor valor del histórico).
- Tiempo más probable (T_m) = el valor más probable.

Las duraciones de las actividades, que son variables aleatorias, se pueden ajustar bien a una distribución de probabilidad de tipo β (Beta) o a una distribución triangular.

En el caso de ajustar la duración de las actividades a una distribución β , la duración "media" de las tres estimaciones mencionadas anteriormente se calcula mediante la fórmula:

$$E(D) = \frac{T_o + 4 \cdot T_p + T_m}{6} \quad (1)$$

En el caso de ajustar la duración de las actividades a una distribución triangular, la duración "media" de las tres estimaciones mencionadas anteriormente se calcula mediante la fórmula:

$$E(D) = \frac{T_o + T_p + T_m}{3} \quad (2)$$

La elección de una u otra distribución para determinar la duración media de las actividades dependerá del grado de conocimiento del panel de expertos elegido: si el panel de expertos está compuesto en su totalidad por profesionales con conocimientos claramente acreditados, se optará por una estimación con distribución triangular (Xu & Zhang, 2015). Si, por el contrario, todos o parte de los expertos que conforman el panel, tienen poca experiencia o no lo suficientemente contrastada, se recomienda el uso de la distribución β .

El camino crítico, de igual manera que las actividades, tendrá una duración aleatoria modelada como una función gaussiana cuya media se obtiene como la suma de las duraciones de las actividades que componen el camino crítico, cuya varianza es la suma de las varianzas de las actividades que componen el camino crítico.

2.4. Determinar la duración del buffer de proyecto y de los buffers de alimentación

Los buffers o amortiguadores se utilizan para mantener el progreso del proyecto ante la aparición de la incertidumbre (que es la causante de la mayoría de los retrasos y sobrecostos de los proyectos) protegiendo así la fecha programada de finalización. Para gestionar la incertidumbre asociada a la duración de las actividades, se añade una protección mediante un buffer (amortiguador) en puntos específicos del proyecto, no en las actividades de manera individual. Dichos amortiguadores son actividades ficticias de duración determinada, encargadas de absorber la incertidumbre, es decir, cualquier retraso en la ejecución de las actividades.

En función de la ubicación de los amortiguadores en el plan de proyecto, se distingue entre tres tipos:

1. Los buffers de proyecto, para absorber cualquier retraso en actividades de la cadena crítica.
2. Los buffers de alimentación, para proteger a la cadena crítica de retrasos en cadenas secundarias.
3. Los buffers de recurso, para advertir a los recursos que se van a necesitar a continuación en la cadena crítica a continuación; generalmente, estos buffers no tienen una duración específica.

Teniendo en cuenta los tres tipos de buffers identificados anteriormente, el presente trabajo se centra en la aplicación de los dos primeros.

El buffer de proyecto se inserta entre la última actividad de la cadena crítica y la fecha de finalización del proyecto, con el objeto de absorber la incertidumbre inherente a los proyectos. Su tamaño depende de la probabilidad deseada para completar el proyecto a tiempo, y variará dependiendo de la duración de las tareas que componen el camino crítico. Los buffers de alimentación se insertan donde las cadenas de actividades no críticas se fusionan con la cadena crítica (Hoel & Taylor, 1999), absorbiendo los potenciales retrasos de estas actividades con el objetivo de evitar que éstos tengan un impacto en la duración del proyecto.

i. Método de Goldratt o del 50% de la cadena.

Se trata de una regla introducida por Goldratt (1997) en su libro "Critical Chain", y es el método más simple y extendido para dimensionar los buffers, ya que establece que el amortiguador debe ser tan largo como la mitad de la duración de los tiempos de protección del conjunto de actividades donde se coloca. Esta regla permite obtener el tamaño de los buffers siguiendo los siguientes cuatro pasos:

1. Estimar la duración de la cadena.
2. Separar las protecciones individuales de cada actividad.
3. Mover esos tiempos de protección al final de la cadena.
4. Reducir al 50% la duración de los tiempos de protección.

Para hacer el cálculo del tamaño del buffer, se utiliza la fórmula (Luiz et al., 2017):

$$Buffer = 0,5x \sum_{i=1}^n (dcPi - dsPi) \quad (3)$$

donde n es el número de actividades de la cadena crítica, i identifica la actividad en cuestión, $dcPi$ es la duración de la actividad i con buffer y $dsPi$ es la duración de la actividad i sin buffer.

ii. Método de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SSQ)

También conocido como fórmula Newbold (Newbold, 2018), determina el tamaño del buffer en función de la variación de la duración de las actividades, calculando dicha variación como la duración de la actividad con protección ($dcPi$), menos la duración de la actividad sin ella ($dsPi$), es decir, las protecciones individuales (Bie et al., 2012). Así, el tamaño del buffer será la raíz cuadrada del sumatorio de las protecciones individuales, elevadas al cuadrado (Ashtiani et al., 2007).

$$Buffer = \sqrt{\sum_{i=1}^n (dcPi - dsPi)^2} \quad (4)$$

2.5. Aplicar simulación Monte Carlo.

Una vez aplicada la técnica PERT y estimadas las duraciones de las tareas, la duración del proyecto se calcula como la suma de las duraciones medias (tiempo esperado) de las actividades del camino crítico. Como complemento a la técnica PERT, la simulación permite tener en cuenta todas las variables y realizar iteraciones experimentando con distintas situaciones para saber qué resultados esperar ante determinadas causas (Ogunlana & Dey, 2019).

La simulación Montecarlo es un conjunto de métodos estadísticos que combina aleatoriedad y determinismo, y que permite resolver problemas matemáticos utilizando números aleatorios como base para realizar simulaciones. John von Neumann y Stanislaw Ulam diseñaron esta idea para facilitar la toma de decisiones en ambientes de incertidumbre (Delgado et al., 2011), ya que permite ver todos los resultados posibles y evaluar el impacto del riesgo. Este método permite predecir un conjunto de resultados, utilizando unos valores comprendidos entre un número mínimo y un número máximo, a partir de un conjunto de valores de entrada fijos.

Conviene remarcar que los resultados obtenidos con esta metodología son estimaciones que permiten hacerse a la idea de cómo el sistema se comportaría ante determinadas condiciones iniciales y con la interacción de distintas variables, pero no es un cálculo exacto ni debe entenderse así. Los pasos a seguir para utilizar los métodos de Montecarlo son (IBM, 2020):

1. Configurar el modelo, identificando tanto la variable dependiente que se debe predecir, como las variables independientes o variables de entrada que van a permitir su predicción.
2. Especificar las distribuciones de probabilidad de las variables independientes y, usando la experiencia o datos históricos, definir un rango de posibles valores y su probabilidad.
3. Realizar simulaciones repetidamente para conseguir los valores aleatorios de las variables independientes hasta que haya suficientes.

En el presente artículo se utilizará el software @Risk® (Palisade LLC, Ithaca, NY, EE. UU.) para realizar la simulación Monte Carlo del diagrama PERT. El uso de la herramienta @Risk permite aumentar la precisión en el tamaño frente a los resultados que se obtendrían con otro tipo de software, al permitir no sólo realizar un gran número de iteraciones para una simulación

(hasta 100.000), sino también el realizar multitud de simulaciones (hasta 1.000), con unos costes computacionales asequibles.

3. Caso de estudio

La metodología presentada en la sección 2 se aplica a un proyecto real de una planta fotovoltaica de 50 MW, ubicada en la provincia de Badajoz (España). Las características técnicas generales del proyecto son:

- Superficie ocupada por el campo solar: 98 ha.
- Número de paneles fotovoltaicos: 91.728 bifaciales de 545 Wp.
- Estructura soporte de los paneles fotovoltaicos: seguidor solar a un eje azimutal, con sistema de hincado monoposte.
- Inversor de corriente: 326 inversores de 150 kVA/c.u.
- Primer nivel de elevación de tensión: 8 centros de transformación, con una potencia total de 48.500 kVA.
- Redes de distribución internas subterráneas de unión de los centros de transformación del primer nivel de elevación de tensión.
- Subestación transformadores de parque: formada por una posición de 50 MVA, en las que se eleva la tensión desde los 30 kV a los 66 kV.
- Línea aérea de evacuación en 66 kV y 8 km de longitud de conexión con la subestación eléctrica de la empresa distribuidora de la zona.

3.1. Establecer un panel de expertos

Para el desarrollo del presente artículo se cuenta con un grupo de cuatro expertos en el desarrollo de proyectos de construcción de instalaciones de generación de energía renovable.

- E1: Project Manager, con dilatada experiencia en el diseño y construcción de instalaciones de energías renovables.
- E2: Promotor de instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.
- E3: Gerente de una empresa constructora de proyectos renovables en la modalidad de engineering, procurement and construction.
- E4: Responsable de desarrollo de instalaciones de producción de energía a partir de fuentes renovables.

3.2. Estimar la duración de las tareas aplicando el método PERT

Para el caso de estudio planteado en este apartado, se han identificado trece tareas. En la Tabla 1 aparece la descripción, duración (en meses) y relaciones de precedencia establecidas para la realización del proyecto en cuestión.

El grafo resultante de aplicar la técnica PERT al caso de estudio, teniendo en cuenta las especificaciones de la Tabla 1, se representa en la Figura 1.

Figura 1: Grafo PERT

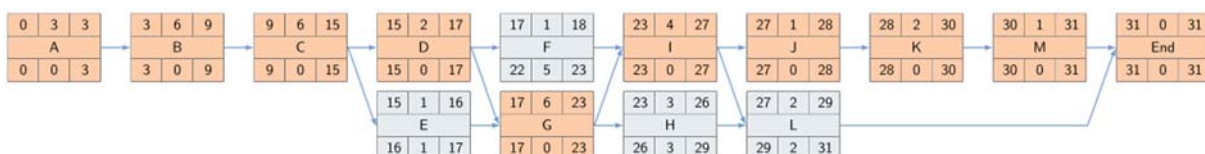


Tabla 1: Listado de tareas y relaciones de precedencia

Tarea	Descripción	Duración	Precedentes
A.- Ingeniería Básica	Elaboración de Proyectos Básicos para inicio de tramitación	3	-
B.- Tramitación Administrativa	Tramitación legal de proyectos (licencia de obras y autorización administrativa)	6	A
C.- Ingeniería de Detalle	Elaboración de Proyectos de Ejecución	6	B
D.- Adquisiciones	Licitación y adjudicación de contratos de suministro y contrata	2	C
E.- Topografía	Replanteo topográfico de la obra a ejecutar	1	C
F.- Recepción de material	Acopio en obra de material electro-mecánico	1	D
G.- Obra civil	Ejecución de trabajos de obra civil: canalizaciones, zanjas, vallados, ...	6	D, E
H.- Edificios	Suministro y montaje de edificios prefabricados (subestación, CT, ...)	3	G
I.- Obra electro-mecánica	Montaje de seguidores, paneles solares y ejecución de cableados eléctricos	4	F, G
J.- Pruebas en frío	Verificaciones mecánicas y eléctricas previas a la puesta en servicio	1	I
K.- Acta de puesta en marcha	Tramitación administrativa requerida para la energización de la instalación	2	J
L.- Caminos	Ejecución definitiva y/refino de caminos externos e internos de la instalación	2	H, I
M.- Conexión a red	Energización, pruebas finales y puesta en operación	1	K

El camino crítico resulta la secuencia de las siguientes tareas A-B-C-D-G-I-J-K-M, con una duración de 31 meses.

3.3. Recopilar las opiniones del panel de expertos sobre la duración de las tareas

Teniendo en cuenta el currículum de los miembros que componen el panel de expertos, se decide utilizar una distribución triangular para las estimaciones de las duraciones de las tareas. A modo de ejemplo, como resultado de aplicar el método Delphi, se obtienen las siguientes opiniones de los expertos sobre la tarea B:

Tabla 2: Opiniones de los expertos para la tarea B

Tarea	Precedentes	Experto	Promedio					
			Optimista	Más probable	Pesimista	Optimista	Más probable	Pesimista
B	A	E1	5	6	12			
		E2	3	6	7			
		E3	5	6	7	4,6058	6,0000	9,1652
		E4	6	6	12			

Para agregar las opiniones de los expertos, se elige el promedio geométrico sobre la media o el promedio aritmético, al obtener un valor menos sensible a los externos de la muestra. Este criterio considera la totalidad de la muestra.

3.4. Determinar la duración del buffer de proyecto y de los buffers de alimentación

Como se ha determinado en la Sección 3.2, el camino crítico está compuesto por las tareas A-B-C-D-G-I-J-K-M, con una duración de 31,159 meses. En cuanto a los buffers de alimentación, el proyecto presenta tres cadenas secundarias:

- Tarea E, con una duración de 0,916 meses.
- Tarea F, con una duración de 0,988 meses.
- Tareas H-L, con una duración conjunta de 4,937 meses.

i. Método de Goldratt o del 50% de la cadena

Teniendo en cuenta el método de Goldratt o del 50%, se calcula el tamaño de los buffers de proyecto y de alimentación. La Tabla 3 resume los resultados obtenidos:

Tabla 3: Determinación de los buffers de proyecto y alimentación y duraciones totales. Método del 50%

Camino	Buffer proyecto	Buffer alimentación	Duración	Duración con buffer
A-B-C-D-G-I-J-K-M	2,181	-	31,159	33,340
E	-	0,039	0,916	0,955
F	-	0,043	0,988	1,031
H-L	-	0,445	4,937	5,382

ii. Método de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SSQ)

De la aplicación del método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, se obtienen los resultados reflejados en la Tabla 4 para el tamaño de los buffers de proyecto y de alimentación y para las duraciones totales:

Tabla 4: Determinación de los buffers de proyecto y alimentación y duraciones totales. Método SSQ

Camino	Buffer proyecto	Buffer alimentación	Duración	Duración con buffer
A-B-C-D-G-I-J-K-M	1,832	-	31,159	32,991
E	-	0,078	0,916	0,994
F	-	0,086	0,988	1,074
H-L	-	0,665	4,937	5,602

Si se comparan los resultados de las Tablas 3 y 4, se observa que el tamaño del buffer de proyecto es menor aplicando el método SSQ. Sin embargo, en el caso de los buffers de alimentación, al tratarse de buffers con un número de tareas muy pequeño, su tamaño es menor con el método del 50%.

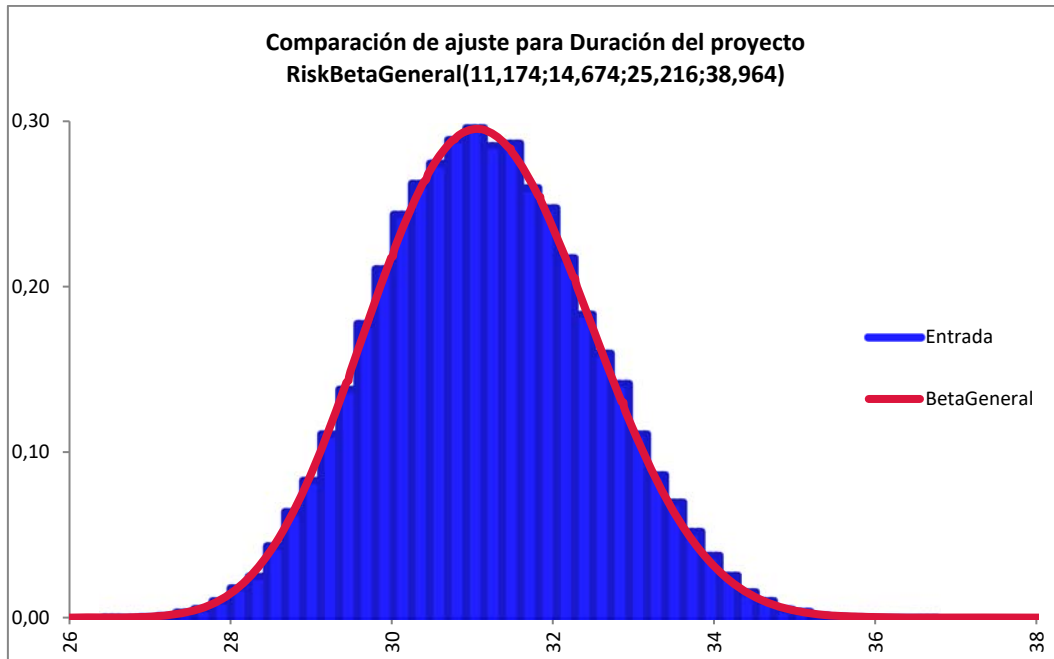
3.5. Aplicar simulación Monte Carlo

Para la aplicación del método Monte Carlo, se parte de los promedios de las opiniones de los expertos para las duraciones pesimista, más probable y optimista, y se considera una distribución triangular para estas tres duraciones.

Introduciendo las duraciones anteriores como funciones de distribución triangular en la herramienta @Risk, se realizan 100 simulaciones Monte Carlo, cada una de ellas con 50.000 iteraciones, con el objeto de poder tener unos resultados representativos de la muestra. En este caso, como duración más probable se considerará la moda de la función de distribución resultado, al tratarse del valor que aparece con más frecuencia dentro del conjunto de valores.

En la Figura 2 se representa la función de distribución de la duración del proyecto resultado de la simulación Monte Carlo. En ella se observa que la distribución que mejor se adapta a los resultados es una distribución "BetaGeneral".

Figura 2: Gráfico salida simulación Monte Carlo y ajuste



Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 5 se resumen los resultados obtenidos para el tamaño de los buffers y las duraciones totales:

Tabla 5. Determinación de los buffers de proyecto y alimentación y duraciones totales. Simulación Monte Carlo

Camino	Buffer proyecto	Buffer alimentación	Duración	Duración con buffer
A-B-C-D-G-I-J-K-M	1,774	-	30,905	32,679
E	-	0,079	0,999	1,078
F	-	0,086	1,000	1,086
H-L	-	0,889	4,999	5,888

4. Resultados: comparación de métodos

Si se comparan los tres métodos aplicados (método de Goldratt, método SSQ y simulación Monte Carlo), se observa que tanto la duración considerada como el buffer de proyecto está más optimizado en el caso de la simulación Monte Carlo, de acuerdo con la Tabla 6.

Tabla 6. Comparativa entre métodos para duración y buffers de proyecto

Método	Buffer proyecto	Duración	Duración con buffer
Goldratt	2,181	31,159	33,340
SSQ	1,832	31,159	32,991
Simulación Monte Carlo	1,774	30,905	32,679

En la Tabla 7 se muestra la comparativa entre los tres métodos utilizados para determinar el tamaño de los buffers de alimentación y de los caminos no críticos. En este caso, se observa que, en el caso de buffers de alimentación para recorridos no críticos con un bajo número de tareas afectadas, los buffers determinados con simulación Monte Carlo son similares a los buffers obtenidos con el método SSQ, por lo que, en situaciones con esta casuística, no es necesario acudir a simulación Monte Carlo para obtener resultados óptimos y se recomienda la aplicación directa del método SSQ.

Tabla 7. Comparativa entre métodos para duración y buffers de alimentación

Camino	Método	Buffer alimentación	Duración	Duración con buffer
E	Goldratt	0,039	0,916	0,955
	SSQ	0,078	0,916	0,994
	Simulación Monte Carlo	0,079	0,999	1,078
F	Goldratt	0,043	0,988	1,031
	SSQ	0,086	0,988	1,074
	Simulación Monte Carlo	0,086	1,000	1,086
H-L	Goldratt	0,445	4,937	5,382
	SSQ	0,665	4,937	5,602
	Simulación Monte Carlo	0,889	4,999	5,888

5. Conclusiones

En este trabajo se ha planteado una nueva metodología para la determinación del tamaño y la duración de un proyecto, aplicado para el caso práctico de una planta de producción eléctrica a partir de energía solar fotovoltaica de 50 MW. En la metodología se ha planteado la composición de un panel de expertos y la aplicación del método Delphi para recopilar sus opiniones sobre la duración de las tareas del proyecto, agregándolas mediante el promedio geométrico, que permite considerar todos los valores de la muestra sin penalizar los valores extremos, como sí ocurre en el caso de utilizar los valores medios o el promedio aritmético.

Para el dimensionamiento de los buffers a partir de las duraciones establecidas por el panel de expertos, se han utilizado dos métodos clásicos, el método de Goldratt y el método SSQ, y se han comparado con los resultados obtenidos de aplicar simulación Monte Carlo. La simulación Monte Carlo se ha realizado con el software @Risk®, el cual permite trabajar directamente con las funciones de distribución, y que proporciona, entre otros valores estadísticos, el valor de la moda de la función de distribución resultado, el cual ha sido elegido para la determinación de las duraciones de las tareas al ser el valor representativo de la totalidad de los datos de la función resultado.

Los métodos tradicionales de dimensionamiento de buffers presentan limitaciones en entornos con incertidumbre, mientras que la utilización de simulación Monte Carlo permite considerar toda la incertidumbre asociada a la duración de cada actividad. Para la determinación de la

duración del proyecto y del tamaño del buffer de proyecto, el método óptimo es el planteado en la metodología del presente artículo basada en simulación Monte Carlo. Sin embargo, en el caso de los buffers de alimentación, para caminos con número reducido de tareas, no se observan mejoras en la optimización entre el método SSQ y simulación Monte Carlo, por lo que se recomienda la aplicación del método SSQ para estos casos de caminos de pequeña entidad, recomendando simulación Monte Carlo para buffers de alimentación más extensos.

6. Bibliografía

- Ashtiani, B., Jalali, G. R., Aryanezhad, M. B., & Makui, A. (2007). A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling. *IEEM 2007: 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2007.4419350>
- 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). <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.649096>
- Delgado, J. A., Jacques, S. L., & y Montiel, S. V. (2011). Monte Carlo Modeling of Light Propagation in Neonatal Skin. In *Applications of Monte Carlo Methods in Biology, Medicine and Other Fields of Science*. <https://doi.org/10.5772/15853>
- Ghaffari, M., & Emsley, M. W. (2015). Current status and future potential of the research on Critical Chain Project Management. In *Surveys in Operations Research and Management Science* (Vol. 20, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2015.10.001>
- Goldratt, E. M. (1997). Critical Chain : A Business Novel. In *Critical Chain*.
- Hoel, K., & Taylor, S. G. (1999). Quantifying buffers for project schedules. *Production and Inventory Management Journal*, 40(2).
- IPMA. (2015). Individual Competence Baseline. In *Internacional Project Management Association*.
- Jinrong, H., & Enyi, Z. (2011). Engineering Risk Management Planning in Energy Performance Contracting in China. *Systems Engineering Procedia*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.08.032>
- Luiz, J. V. R., Souza, F. B. de, & Luiz, O. R. (2017). Práticas PMBOK® e Corrente Crítica: antagonismos e oportunidades de complementação. *Gestão & Produção*, 24(3). <https://doi.org/10.1590/0104-530x1510-16>
- Newbold, R. C. (2018). Project management in the fast lane: applying the theory of constraints. In *CRC Press*.
- Ogunlana, S. O., & Dey, P. K. (2019). Risk Management in Engineering and Construction: Tools and Techniques. In *Risk Management in Engineering and Construction: Tools and Techniques*. <https://doi.org/10.1201/9780203887059>
- Project Management Institute. (2017). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK) / Project Management Institute. In *Sexta Edición* (Vol. 1).
- Xu, Z., & Zhang, X. (2015). Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information (Knowledge-Based Systems (2013) 52 (53-64)). In *Knowledge-Based Systems* (Vol. 77). <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.01.012>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

