

**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA ESTIMACIÓN Y GESTIÓN DE
AMORTIGUADORES EN LA ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS POR
CADENA CRÍTICA**

GERMAN DAVID ANTONIO SUAREZ BAUTISTA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2016**

**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA ESTIMACIÓN Y GESTIÓN DE
AMORTIGUADORES EN LA ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS POR
CADENA CRÍTICA**

GERMAN DAVID ANTONIO SUAREZ BAUTISTA
Proyecto de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Industrial

Directora:
ELIANA MARCELA PEÑA TIBADUIZA
Ingeniera industrial, MS.c

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA

2016

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. MARCO TEÓRICO.	18
3.1. Definiciones generales:.....	18
3.2. Teoría de Restricciones (TOC):	19
3.3. Cadena Crítica:.....	22
3.4. Lógica difusa:	31
4. METODOLOGÍA:	35
5. PLANEACIÓN DE LA REVISIÓN.....	36
5.1. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE UNA REVISIÓN.....	36
5.2. PREPARACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA REVISIÓN.	37
5.3. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN	38
6. EJECUCIÓN DE LA REVISIÓN	40
6.1. IDENTIFICACIÓN DE ESTUDIOS.....	40
6.2. SELECCIÓN DE LOS ESTUDIOS.....	40
6.3. EVALUACION DE LA CALIDAD DE LOS ESTUDIOS	41
6.4. EXTRACCIÓN DE DATOS Y VIGILANCIA DE LOS PROGRESOS ...	42
6.5. SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN.....	42
7. REPORTE Y DISEMINACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	43
7.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO.....	43
7.2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	50
7.2.1. Estimaciones con base en métodos tradicionales de gestión de proyectos	50
7.2.2. Características y atributos del proyecto.....	55

7.2.3.	Métodos de dimensionamiento difusos	74
7.2.4.	Otros métodos.....	82
7.2.5.	Gestión de los amortiguadores.....	84
8.	CONCLUSIONES	89
9.	RECOMENDACIONES	92
	BIBLIOGRAFÍA.....	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pasos para aplicar la teoría de restricciones.....	21
Figura 2. Separación de las Tolerancias.....	24
Figura 3. Identificar la cadena crítica.	25
Figura 4. Amortiguador de proyecto.....	25
Figura 5. Amortiguadores de alimentación.....	26
Figura 6. Cadena crítica y no críticas.....	27
Figura 7. Cuadro de control de amortiguadores.	30
Figura 8. Función de membresía conjunto clásico.	32
Figura 9. Función de membresía conjuntos difusos.....	32
Figura 10. Función de membresía triangular.....	33
Figura 11. Función de membresía trapezoidal.	33
Figura 12 . Etapas de la revisión sistemática.	35
Figura 13. Etapas de la revisión sistemática.....	38
Figura 14. Numero de Publicaciones por Año.....	43
Figura 15. Aduna de autores.	44
Figura 16. Revistas con mayor número de publicaciones.	45
Figura 17. Artículos más citados por los autores.	46
Figura 18. Aduna palabras clave.	47
Figura 19. Correlación entre palabras clave.	48
Figura 20. Top Palabras Clave.	49
Figura 21. Retrabajo producido por retroalimentación sin superposición	71

Figura 22. Retrabajo producido por transmisión de información sin superposición.....	72
Figura 23. Retrabajo producido en superposición	72
Figura 24 índice de acuerdo	76
Figura 25 Cuadro de gestión de amortiguadores	85
Figura 26 Cuadro de gestión de amortiguadores modificado	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.	38
Tabla 2 . Numero de artículos de cada base de datos.	41
Tabla 3. Numero de artículos seleccionados de cada base de datos.....	42
Tabla 4. Autores con mayor número de publicaciones.....	45

RESUMEN

TÍTULO: ESTADO DEL ARTE SOBRE LA ESTIMACIÓN Y GESTIÓN DE AMORTIGUADORES EN LA ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS POR CADENA CRÍTICA*

AUTOR: SUÁREZ BAUTISTA, German David Antonio**

PALABRAS CLAVE: Cadena Crítica, Gestión de proyectos, CC/PM, Dimensionamiento de amortiguadores, Características de los proyectos, Números difusos, Incertidumbre.

Descripción:

La Cadena Crítica método desarrollado por Goldratt para la gestión de proyectos basado en la teoría de restricciones, ha demostrado ser más efectivo frente a los métodos tradicionales de gestión de proyectos como PERT y CPM. Cómo se estiman los amortiguadores es una parte fundamental del método de cadena crítica, debido a que, si esto no se realiza adecuadamente, se puede perder toda la filosofía del método. Uno de los aspectos más criticados a Goldratt es la falta de análisis matemático en la estimación de los amortiguadores, sin tener en cuenta que omite las características propias de cada proyecto. En proyectos de grandes números de actividades, el método de Goldratt estima amortiguadores muy grandes, debido a su crecimiento lineal. Newbold propone estimar los amortiguadores por medio del cuadrado medio del error, sin embargo, en actividades con duraciones sesgadas a la derecha, este método no provee una protección suficiente. En búsqueda de solucionar los problemas existentes en la estimación de amortiguadores diversos autores desarrollan métodos que garanticen un tamaño óptimo de los amortiguadores protegiendo de manera efectiva la fecha de terminación del proyecto establecida. Este trabajo busca mostrar los métodos que se han estado desarrollado en los últimos años con el objetivo de ver el estado actual del tema y ser un punto de inicio para futuras investigaciones sobre la administración de proyectos por Cadena Crítica.

* Tesis de grado

** Facultad de ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Directora, MA. Eliana Marcela Peña Tibaduiza

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART ON BUFFER SIZING AND
MANAGEMENT IN CRITICAL CHAIN
PROJECT ADMINISTRATION*

AUTHOR: SUAREZ BAUTISTA, German David Antonio**

KEYWORDS: Critical Chain, Project Management, CC / PM, Buffer Sizing, features projects, fuzzy numbers, Uncertainty.

Description:

The Critical Chain method developed by Goldratt for project management based on the theory of constraints, has proven to be more effective compared to traditional project management methods like PERT and CPM. How buffer is estimated it is a fundamental part of the critical chain method, because if this is not done properly, you can lose the whole philosophy of the method. One of the most criticized aspects to Goldratt is the lack of mathematical analysis in the estimation of the buffers, regardless that omits features of each project. In projects of large numbers of activities, the method of Goldratt believes very large buffers, due to its linear growth. Newbold aims to estimate the buffers by the mean square error, however, in activities with durations skewed to the right, this method does not provide sufficient protection. In search of solving existing problems in estimating various buffers authors develop methods to ensure optimum size of buffers effectively protecting the termination date of the project established. This work aims to show the methods that have been developed in recent years in order to view the current status of the subject and be a starting point for future research about critical chain project management.

* Degree Project.

** Physicomechanical Engineering's Faculty. School of Industrial Engineering and Business.
Director: Msc Eliana Marcela Peña Tibaduiza

INTRODUCCIÓN

La gestión de proyectos tiene una larga historia, que se refleja en las maravillas hechas por el hombre del mundo. Sin embargo, ¿lo hicieron en la fecha prevista? ¿Lo hicieron a un presupuesto aprobado? ¿Se cumplen con todas las especificaciones y normas? Cada vez más en los últimos años, la respuesta a cada una de estas preguntas es "no".¹

Si alguien pregunta ¿cuál es el objetivo de la administración de proyectos?, la respuesta sería: cumplir con la triple restricción, esto se traduce en que los proyectos se cumplan en el tiempo estipulado, bajo el presupuesto previsto y con el alcance solicitado. Pero los métodos tradicionales de administración de proyectos, en un gran porcentaje, no podían cumplir con estas tres especificaciones. Esto se debía a que gran parte de estos no podían hacer frente los problemas ocasionados por la incertidumbre en la duración de las actividades del proyecto y el tener recursos limitados, que llegan a causar retrasos al no gestionarse adecuadamente.

En 1997 que Goldratt² presentó un nuevo método denominado Critical Chain [Cadena Crítica], la cual, con la aplicación de la teoría de restricciones a la administración de proyectos, se contempla una manera para afrontar las restricciones entre recursos limitados y la incertidumbre de la duración de las actividades por medio de la gestión de amortiguadores.

¹ LEACH, Lawrence. Critical Chain Project Management. Boston: Artech House professional development library, 2000. 337 p.

² GOLDRATT, Eliyahu. Cadena Crítica. Monterrey: Ediciones Castillo, 1997. 244 p.

Una de las deficiencias más notables de la cadena crítica es la falta de análisis matemático, en especial, en la determinación del tamaño de los amortiguadores, donde Goldratt sugería usar el 50% de la duración de la cadena crítica como amortiguador del proyecto³.

El problema es que una mala estimación de la duración de los amortiguadores y una mala gestión de los mismos, puede hacer perder por completo la filosofía de la cadena crítica y llevar un proyecto al fracaso.

Debido a eso, se han realizado investigaciones en diversos campos, donde autores como Herroelen y Leus⁴, Bie, Cui, Zuo, Zhang⁵, Zhang, Song, y Diaz⁶, han realizado un arduo trabajo recopilando información de diferentes fuentes, proponiendo nuevos métodos de cálculo del tamaño y gestión de amortiguador, comparándolos entre sí con el fin de aportar la mejora del método de cadena crítica.

Se propone realizar mediante este trabajo, una recapitulación sobre la estimación y gestión de los amortiguadores en la administración de proyectos por cadena crítica, donde se pueda observar una perspectiva global de las investigaciones relevantes sobre el tema, encontrando vacíos que puedan ser el origen de futuras exploraciones con el fin de dar solución a los problemas no investigados.

³ ASHTIANI, Behzad *et al.* A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling. En: International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (2007). Vol. 1, No 4; p. 137 – 141.

⁴ HERROELEN, Willy y LEUS, Roel. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. En: Journal of Operations Management. (2001). Vol. 19 No. 5; p. 559-577.

⁵ ZHANG, Xiaoming *et al.* Buffer Sizing Method with considering effect of various Uncertainties based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Critical Chain Scheduling. En: Emergency Management and Management Sciences. (2011). p. 566–569.

⁶ ZHANG, Janguang *et al.* Buffer sizing of critical chain based on attribute optimization. En: Concurrent Engineering-Research and Applications. (2014). Vol. 22 No. 3; p. 253-264.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Por más de 50 años PERT Y CPM han sido los métodos más utilizados para la programación y administración de proyectos, los cuales han tenido muchos problemas para completar sus objetivos en el tiempo establecido debido a no tener en cuenta el problema de la capacidad de los recursos limitados, la falta de conciencia del síndrome del estudiante, la ley de Parkinson y otras cuestiones. Esto resulta en un aumento de los insumos pertinentes, lo cual se ve reflejado en un costo adicional no presupuestado⁷.

Con la aparición de la novela Critical Chain ⁸[Cadena Crítica] se creó una nueva filosofía para administrar proyectos con su mismo nombre, basada en la teoría de restricciones, la cual busca una solución suficientemente buena con la cual se podía reducir la incertidumbre, el tiempo de ejecución del proyecto y controlar las restricciones entre recursos, por medio de la gestión de amortiguadores.

Goldratt propuso el método C & PM (Cut and Paste), donde el amortiguador del proyecto, se obtiene dividiendo la duración de las actividades de la cadena crítica a la mitad. “Sin embargo, considerar el 50% de la longitud de cadena crítica como amortiguador de proyecto puede hacer que este sea demasiado largo, lo que lo hará conducir a una pérdida de recursos y la pérdida oportunidades de negocio.”⁹.

⁷LIU, Jingchao y WHANGBO, Taeg-Keun. A Study on the Buffer Sizing Method of CCPM Technique Using Statistical Analysis. En: Convergence and Hybrid Information Technology: (6th International Conference: 2012: Daejeon. p. 672-679.

⁸ GOLDRATT, Op. cit.

⁹ HERROELEN, Op. cit. p. 564.

Newbold propone la RSEM (Root Square Error Method) un método de estimación de amortiguadores basado en el teorema del límite central y la idea de que las duraciones de las actividades se supone que son independientes entre sí. De hecho, las actividades dentro de esta red tienen correlaciones y por lo tanto puede verse afectada por los mismos factores, tales como las limitaciones de recursos o la complejidad de la red, que hacen que el tamaño del búfer calculado por RSEM sea más pequeño de lo necesario¹⁰.

Sin embargo, C & PM y RSEM se han convertido en la base de la investigación por muchos autores que buscan la manera de superar las deficiencias que poseen estos dos métodos.

Por parte de la gestión de los amortiguadores, se pueden crear falsas alarmas cuando en realidad las cosas se están realizando bien, y puede omitir proyectos que se encuentran en problemas, pero se considera están realizando un buen trabajo¹¹. Además, se están realizando investigaciones sobre el multimodo, los atributos de las actividades, el manejo del riesgo, la aplicación de la lógica difusa y diversos temas más.

Teniendo en cuenta estos problemas, se considera necesario la realización de un estado de arte con el objetivo de sintetizar parte de las investigaciones realizadas en la actualidad con el fin de tener un concepto general de las investigaciones realizadas, las tendencias y los aporte que se han hecho a la estimación y gestión de amortiguadores en cadena crítica, buscando crear futuras brechas de investigación ayudando a madurar el método de la cadena

¹⁰ HOEL, Kjersti y Taylor, Sam. Quantifying buffers for projects schedules. En: Production and Inventory Management Journal. (1999). Vol. 40, No 2; p. 43-47.

¹¹ AGARWAL, Atul y LARSON, David. A modified prescriptive model to mitigate behavioral issues in project management. En: Academy of Information and Management Sciences. (2013). Vol. 17, No 2; p. 21- 24

crítica para administración de proyectos y colaborar en el fortalecimiento del grupo OPALO para la formulación de nuevos proyectos de investigación tanto a nivel de pregrado como de maestría.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión sistemática de la literatura acerca de la estimación y gestión de amortiguadores en la administración de proyectos bajo el enfoque de cadena crítica obteniendo un análisis detallado de su evolución y tendencias con el fin de identificar posibles oportunidades de investigación.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una inmersión literaria de la estimación y gestión de los amortiguadores en la administración de proyectos bajo el enfoque de cadena crítica.
2. Recopilar información de la estimación y gestión de los amortiguadores en la administración de proyectos por cadena crítica, evaluando la calidad de los estudios y su pertinencia con el proyecto.
3. Interpretar y presentar los resultados de la revisión sistemática de la literatura por medio de un documento, a partir de la integración y síntesis de la documentación encontrada.
4. Elaborar un artículo publicable que en marque los principales resultados del trabajo de investigación.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. DEFINICIONES GENERALES:

Incertidumbre: se refiere el grado de desconocimiento acerca de una situación futura, la cual es derivada principalmente por la falta de información. En los proyectos tener un alto grado de incertidumbre conlleva tener un gran riesgo el cual puede causar retrasos y sobrecostos.

Entorno Multi-proyecto: Son entornos dónde conviven varios proyectos que compiten por unos recursos compartidos. Los objetivos principales en la gestión de multi-proyectos son la productividad de los recursos y la velocidad de los proyectos. El problema reside en que las decisiones que benefician uno de dichos objetivos suelen perjudicar al otro. Para que los proyectos sean realizados lo más rápido posible deberíamos disponer de más recursos, pero entonces algunos de ellos estarían, en parte, ociosos. En cambio, si quisiésemos saturar a los recursos serían los proyectos los que deberían esperar¹².

Reglas de Prioridad: Son ecuaciones restrictivas usadas usualmente en técnicas heurísticas con el objetivo de obtener un buen resultado (sin ser el óptimo) con una carga computacional baja. Estas reglas dan la orientación necesaria al software para obtener un resultado que satisfaga el sistema, teniendo como ejemplo de reglas de prioridad, minimizar la duración del proyecto, maximizar el uso de los recursos, minimizar el trabajo en proceso, entre otros.

¹² TEOCÉ CONSULTORS, Bases para la gestión de multiproyectos con CCPM. Critical Chain Project Management. [En línea] <http://www.teoce.com/rcs_prod/La_aplicaci_n_de_CCPM_a_entornos_de_multiproyectos.pdf> [citado en 26 de abril de 2016]

Actividades Multi-Modo: Se refiere a que las actividades pueden ser realizadas de maneras diferentes, utilizando recursos diferentes, duraciones diferentes, en diferentes momentos y conduciendo a diferente nivel de incertidumbre.

3.2. TEORÍA DE RESTRICCIONES (TOC):

Filosofía desarrollada por Eliyahu M. Godratt que se dio a conocer tras la publicación de su libro¹³ “The Goal” [La Meta] en 1984. La TOC se encuentra basada en el hecho de que los procesos que se realizan de manera secuencial en multitarea y se mueven a la velocidad de la actividad más lenta. Para poder aumentar la velocidad de flujo del proceso es necesario realizar mejoras en la actividad más lenta con el fin de explotarla a su máxima capacidad para acelerar el proceso en general.

La teoría de restricciones se basa en sistema DBR (tambor, amortiguador, cuerda), el cual, busca identificar los recursos que poseen capacidad restringida y subordinar el flujo de producción a la velocidad del recurso más lento.

El recurso más lento de todo el sistema se conoce como “Drum” (tambor) también denominado en la literatura como cuello de botella y es el que marca la velocidad o ritmo de producción del sistema. Para proteger al tambor es necesario un “Buffer” (amortiguador) de inventario según el recurso limitado, con lo cual, se evita que este recurso, deje de operar por algún problema ocasionado en los recursos que no son cuellos de botellas, con el fin de evitar la pausa del tambor.

¹³ GOLDRATT, Eliyahu y COX, Jeff. La meta. Madrid: Díaz de Santos. (2005). p. 418.

Para evitar acumulaciones de inventario en proceso innecesarias en el sistema, es necesario llevar una "Rope" (Cuerda) que ate la primera operación con el tambor, con el fin de que el nivel de producción de cada una de las actividades posea un ritmo de producción igual al del cuello de botella.

Existen principalmente tres tipos de restricciones, la cuales se deben tener en cuenta a la hora de identificar el cuello de botella, ellas son:

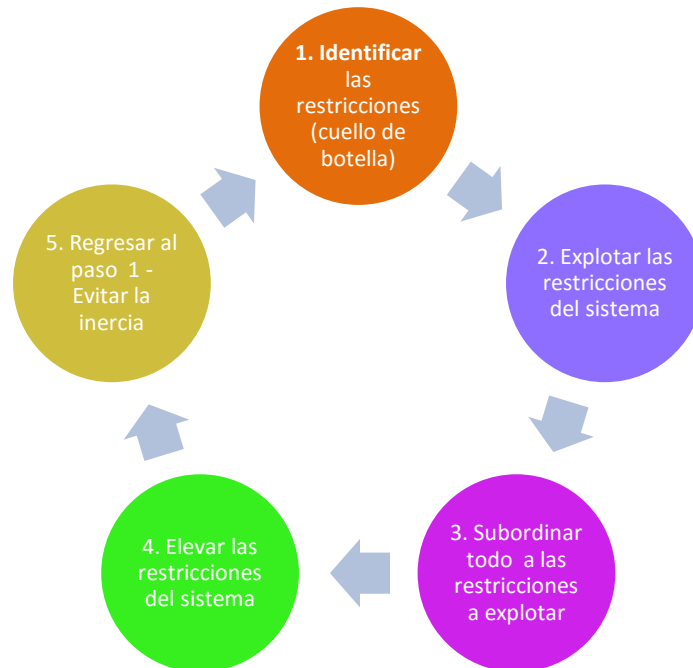
Restricciones físicas: Son aquellas en las cuales se pueda ver relacionado cualquier factor tangible del proceso, como un operario o una máquina.

Restricciones de mercado: Se presentan cuando existe algún impedimento ocasionado por la demanda de sus productos. Estos suelen ser de carácter externo a la compañía.

Restricciones de políticas: Son las ocasionadas por procedimientos, políticas y prácticas que se estipularon para el funcionamiento de la compañía, que conllevan a no poder obtener los resultados deseados. Estas son de carácter interno de la compañía.

El método que emplea la teoría de restricciones se puede resumir en la siguiente imagen.

Figura 1. Pasos para aplicar la teoría de restricciones.



1. Identificar las restricciones: Se debe identificar el eslabón más débil de la cadena que está restringiendo el Throughput del sistema. En un entorno de manufactura la restricción puede ser una etapa del proceso productivo por ejemplo una máquina donde se esté acumulando inventario en proceso, por otra parte, si se desea identificar la restricción en un proyecto se debe definir la sucesión de actividades más larga del proyecto que determina el tiempo del mismo; a esta sucesión se conoce como la Cadena Crítica. La dependencia entre las actividades está dada por su relación temporal, necesidad de precedencia y el hecho de que el mismo recurso es necesario para su ejecución.

2. Explotar las restricciones del sistema. Para poder maximizar el sistema, la restricción debe estar operando a su máxima capacidad. Es

necesario realizar las adecuaciones necesarias para que la restricción nunca se detenga y siempre opere en su máximo desempeño.

- 3. Subordinar todo a las restricciones a explotar:** Este paso establece que las operaciones que no se comportan como restricción deben “subordinarse” de modo de apoyar en un 100% el desempeño máximo de la operación restricción.

- 4. Elevar las restricciones del sistema:** Se mejora la capacidad de la restricción. De este modo, el sistema aumenta su nivel de producción.

- 5. Regresar al paso 1 – Evita la inercia:** Una vez mejorada la capacidad de la restricción a tal punto que esta deja de restringir el sistema, se debe realizar de nuevo el proceso identificando la nueva restricción o cuello de botella para poder mejorar el sistema cada vez más¹⁴.

3.3. CADENA CRÍTICA:

Método propuesto por Eliyahu M. Godratt para la administración de proyectos basado en la teoría de restricciones a través de su libro “Critical Chain” ¹⁵[cadena crítica] en 1999. La cadena crítica se considera como la cadena más larga (tiempo) de tareas dependientes, tanto entre tareas como en recursos.

¹⁴ PALACIOS, Nicanor. Teoría de restricciones aplicada al desarrollo de software. Trabajo de grado (Maestría en Dirección de empresas). Universidad Andina Simón Bolívar. Sede Ecuador.

¹⁵ GOLDRATT, Eliyahu. Cadena Crítica. Monterrey: Ediciones Castillo, 1997. 244 p.

Goldratt observó que la gran mayoría de los proyectos se prolongan hasta su fecha límite de entrega, lo cual hace posible que se presenten retrasos no previstos por el administrador de proyectos. Estos retrasos son explicados por comportamientos humanos basados en las siguientes dos teorías:

Ley de Parkinson: Afirma que “el trabajo se expande hasta cubrir todo el tiempo asignado para su ejecución”.

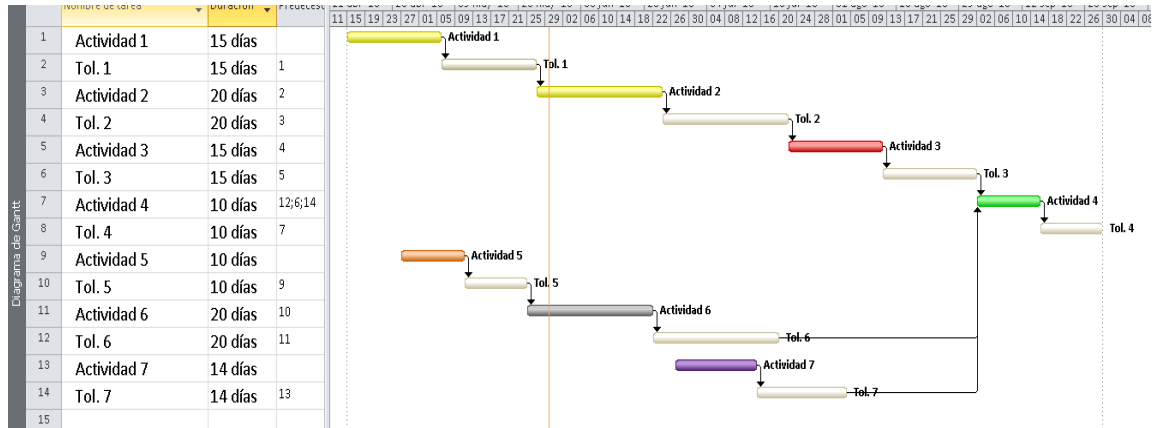
Síndrome del Estudiante: provoca que el inicio de cada tarea se vaya postergando hasta realizarla en el último momento, ocasionando el posible no cumplimiento de los resultados que puede ocasionar retrasos.

Así mismo, Goldratt observó que la duración de las actividades estaba siempre sobreestimada, no obstante, eso no es malo, porque hay que prever algún evento desafortunado que pueda ocurrir. El problema es que asegurar cada una de las actividades de forma individual conduce a realizar un proyecto en un tiempo mucho mayor al que se podría realizar.

A continuación, se muestran los pasos propuestos por Goldratt para el método de cadena crítica:

Paso 1: Separar las tolerancias de cada una de las tareas reduciendo las duraciones de las mismas a la mitad. En la Figura 2 aparecen estas tolerancias en color blanco.

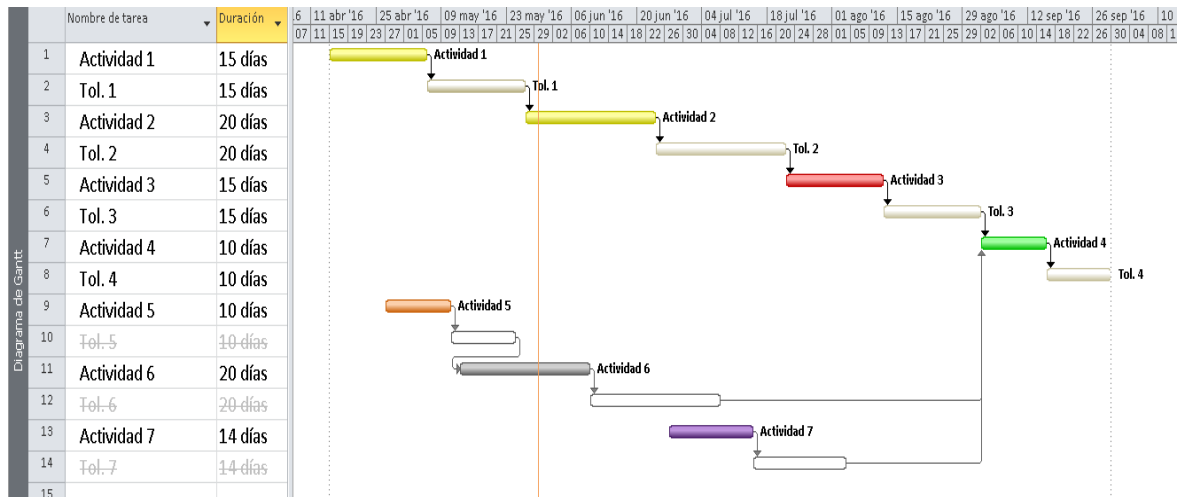
Figura 2. Separación de las Tolerancias



Paso 2: Solucionar los conflictos de recursos entre actividades, Goldratt no especifica cómo solucionarlo, pero se han desarrollado diversos algoritmos que tienen como objetivo crear cronogramas óptimos de recursos limitados, estos problemas son conocidos como RCPS (Resource Constrains Project Scheduling Problem).

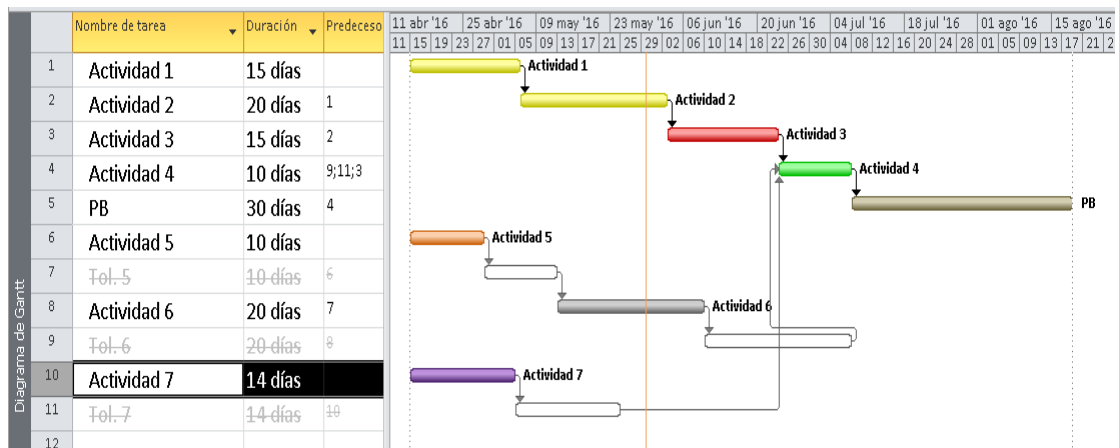
Paso 3: Identificar la cadena crítica la cual es considerada nuestra restricción principal, y centrarse en las tolerancias de sus actividades como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3. Identificar la cadena crítica.



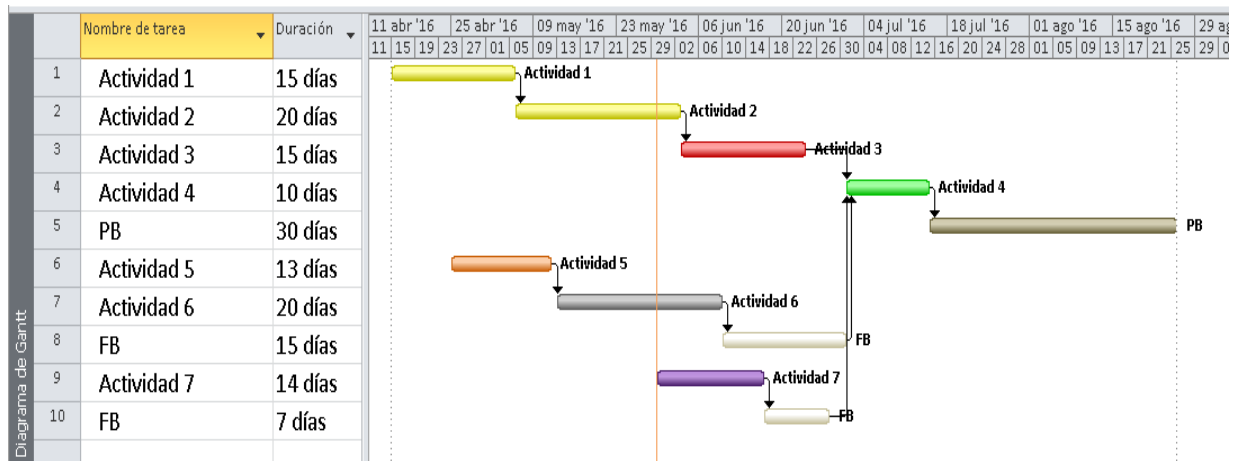
Paso 4: Sumar todas las tolerancias de todas las actividades de la cadena crítica y tomar la mitad como un amortiguador colocándolo al final de la última actividad como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4. Amortiguador de proyecto.



Paso 5: Se debe proteger a la cadena crítica de las cadenas no críticas que se conectan en algún punto de las actividades, para esto se realiza el mismo procedimiento que en el paso 3 pero para cada cadena no crítica creando así amortiguadores de alimentación.

Figura 5. Amortiguadores de alimentación.



Para asegurar el éxito de los proyectos, la cadena crítica se basa en la gestión de amortiguadores, los cuales son tiempo o colchones de seguridad que sirven para absorber el tiempo de retraso en las actividades, producido por la incertidumbre en estas y por las teorías de la ley de Parkinson y el síndrome del estudiante. Los amortiguadores se ubican en lugares estratégicos con el fin de mitigar el impacto producido por los retrasos en las actividades y se pueden clasificar en los siguientes:

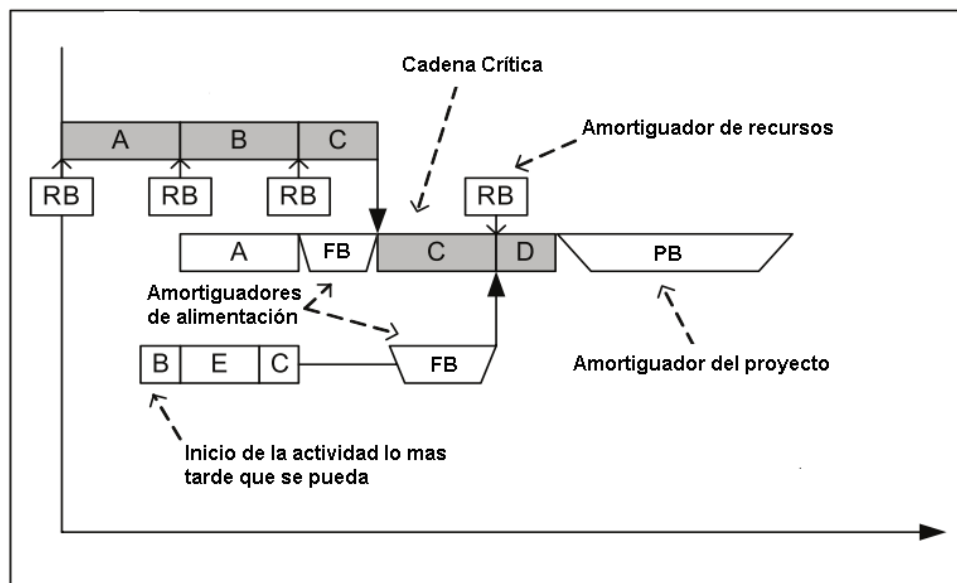
Amortiguador del proyecto (PB): protege al proyecto en conjunto, asegurando que se cumpla en el cronograma establecido en cuanto, a los contratiempos que puedan surgir de alguna de las actividades de la cadena crítica. Se ubica después de la última actividad de la cadena crítica.

Amortiguador de alimentación (FB): protege a la cadena crítica de cualquier retraso ocasionado en las cadenas no críticas. Estas cadenas no críticas son cualquier extensión de actividades que se conectan a la cadena crítica en un punto. El FB se ubica al final de cada una de las cadenas no críticas.

Amortiguador de recursos (RB): se trata de una actividad virtual que se inserta justo antes de las actividades de la cadena crítica cuando requieren de la utilización de recursos de gran importancia. Su función es la de servir de advertencia para realizar un alistamiento de los recursos necesarios para esa actividad.

En la Figura 6. podemos observar la ubicación de los amortiguadores en un proyecto:

Figura 6. Cadena crítica y no críticas.



Traducido de: Geekie y Steyn¹⁶

¹⁶ GEEKIE, A. y STEYN, H. (2008). Buffer sizing for the critical chain project management method. En: South African Journal of Industrial Engineering (2008) Vol 19, No(1); p. 73-88.

Estimaciones de tamaño del amortiguador más conocidas:

Método de Copiar y pegar (Cut and Paste Method)

Para la estimación del tamaño de los amortiguadores, Goldratt¹⁷ propuso el método C & PM, el cual consta dividir la duración de las actividades de cada cadena a la mitad, sumándolas y tomando la mitad de ese resultado como amortiguador. Esto se aplica para la cadena crítica y las cadenas no críticas, obteniendo los FB y el PB respectivamente.

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \frac{1}{2} \sum 0.5d_i \quad (1)$$

Método de la raíz cuadrada del error (Root Square Error Method)

Otro método ampliamente utilizado en la literatura es el RSEM (método de error de la raíz cuadrada) desarrollado por Newbold¹⁸, un método de estimación de amortiguadores basado en el teorema del límite central y la idea de que las duraciones de las actividades se supone que son independientes entre sí describiéndose como una distribución Lognormal. En este método, la incertidumbre de la duración de cada tarea se calcula como la diferencia de su estimación segura (90%) y su promedio (50%) estimación.

¹⁷ GOLDRATT, Eliyahu. Cadena Crítica. Monterrey: Ediciones Castillo, (1997), p. 244.

¹⁸ NEWBOLD, Robert, Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints. Boca Raton: St. Lucie Press, (1998). p. 284.

También sugiere que la desviación estándar de la duración de cada tarea es la mitad de la diferencia, por lo tanto, el tamaño del búfer es dos veces más que la desviación estándar de la cadena.

Siendo U_i la incertidumbre de la duración de la actividad i , n el número de actividades en la cadena crítica, S_i sea la estimación segura (90%) de la actividad i y d_i a ser la estimación promedio (50%) de la actividad i . A continuación, el tamaño del búfer del proyecto se calcula como:

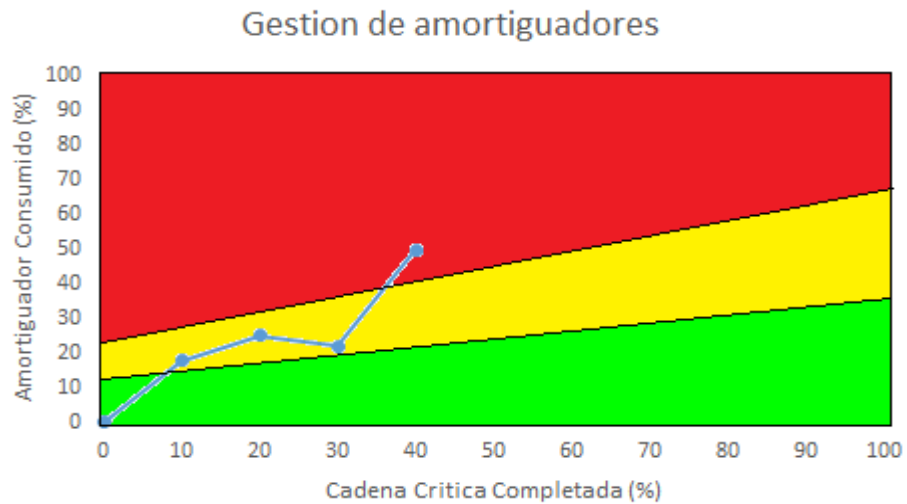
$$U_i = \frac{S_i - d_i}{2} \quad (2)$$

$$\text{Tamaño del amortiguador} = 2\sigma = 2 \times \sum_{i=1}^n (U_i^2)^{1/2} \quad (3)$$

Seguimiento y Control de los amortiguadores:

Para llevar un control del estado del proyecto, se realiza una gestión en los amortiguadores en la cual, se evalúa cual es el consumo de este a la fecha de revisión. En la Figura 7, se presenta el cuadro de control que es usado más frecuente para la gestión de los amortiguadores.

Figura 7. Cuadro de control de amortiguadores.



Cuando el amortiguador se encuentra en el área verde, se debe observar el comportamiento de las actividades, cuales son las fuentes de retraso y mirar si se puede solucionar sin mayor problema.

Si el amortiguador llega a la zona amarilla se tiene que empezar a realizar planes de contingencia para evitar que se desgaste más el amortiguador y poder ganar tiempo para reducir su consumo.

En caso de que el amortiguador llegue a la zona roja es necesario tomar acciones correctivas inmediatamente, de ser necesario se pueden usar métodos como el Crashing o el Fast-Traking para intentar detener el consumo del amortiguador con el fin de no causar un retraso en la cadena crítica o en la terminación del proyecto.

3.4. LÓGICA DIFUSA:

Creada y desarrollada por Lotfi Zadeh en 1965, es un tipo de lógica donde las proposiciones pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad dentro de una escala. Por ejemplo, la frase "hoy es un día soleado", puede ser 100% verdad si no hay nubes, 80% verdad si hay pocas nubes, 50% verdad si existe neblina y 0% si llueve todo el día.

La lógica difusa ha sido tan importante para diversos campos y aplicaciones, debido a que puede representar la incertidumbre matemáticamente proporcionando herramientas para su desarrollo y aplicación. Esta se basa en la teoría de los conjuntos difusos.

Los conjuntos difusos:

Los conjuntos difusos se diferencian ampliamente de los conjuntos clásicos, debido a que en la teoría de los conjuntos clásicos un elemento de un conjunto clásico pertenece completamente al conjunto o no pertenece, mientras que, en los conjuntos difusos, a un elemento o miembro se le asigna un grado de pertenencia en escala de 0 a 1, la cual es llamada función de pertenencia (μ), donde 1 significa que tiene una pertenencia total al sistema y 0 ninguna pertenencia^{19,20}.

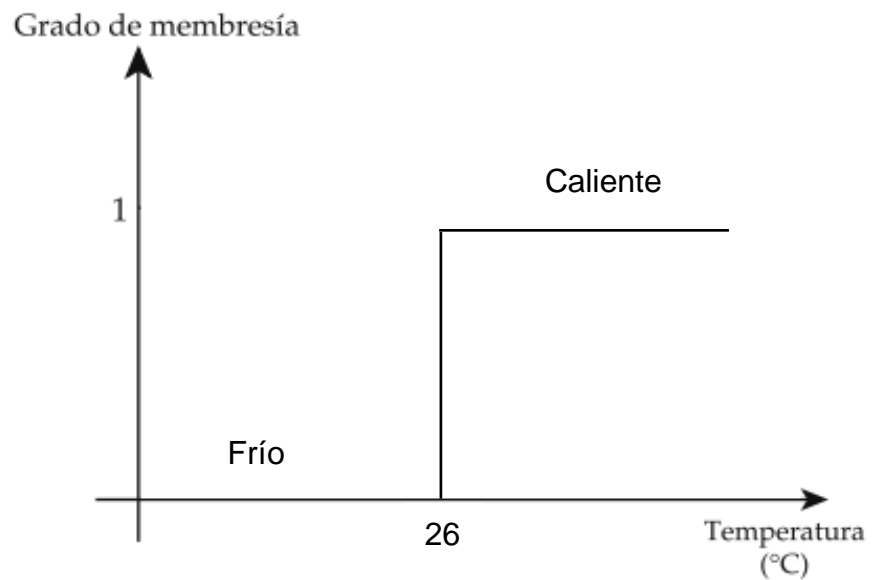
Como se puede observar en la Figura 8, la función nos quiere decir que el agua se considera fría por debajo de 26° C con grado de pertenencia 0 y de ahí en adelante se considera caliente con grado de pertenencia 1.

¹⁹ GUZMÁN, D y CASTAÑO, M. La lógica difusa en ingeniería: Principios, aplicaciones y futuro. En: Ciencia y Tecnología. (2006). Vol. 24, No 2; p. 87-107.

²⁰ BALTA, Op. cit, p. 33.

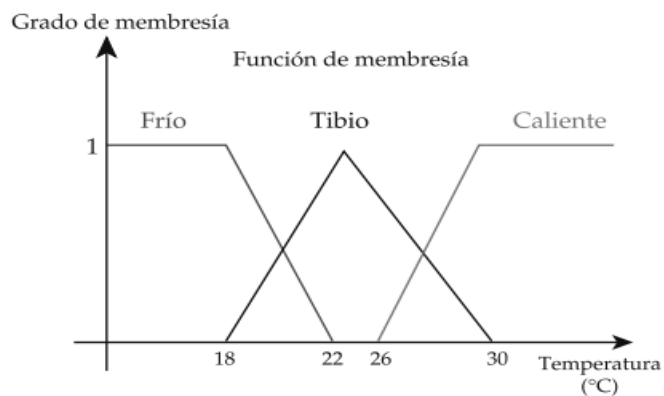
Mientras que en la Figura 9, se puede observar que a medida que la temperatura del agua cambia, su nivel de membresía cambia, pasando por los tres tipos de variables lingüísticas (frío, tibio, caliente) las cuales describen las funciones de membresía.

Figura 8. Función de membresía conjunto clásico.



Adaptada de: (Guzmán, 2006)

Figura 9. Función de membresía conjuntos difusos.



Tomada de: (Guzmán, 2006)

En la literatura, la mayoría de las funciones de membresía son lineales por tramos usadas debido a su facilidad, son funciones triangulares y trapezoidales. Un ejemplo de ellas se presenta en las Figuras 9 y 10, donde se muestran funciones de pertenencia triangular y trapezoidal, y sus parámetros para el conjunto difuso "T".

Figura 10. Función de membresía triangular.

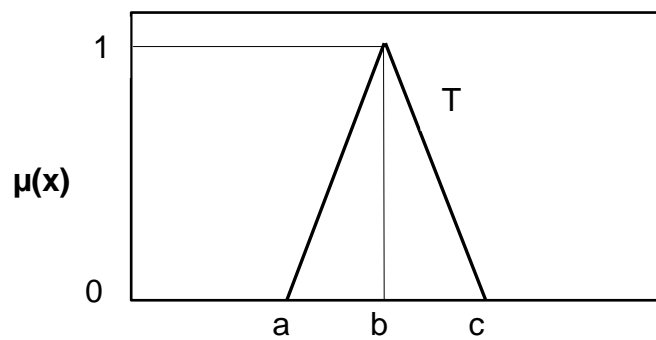
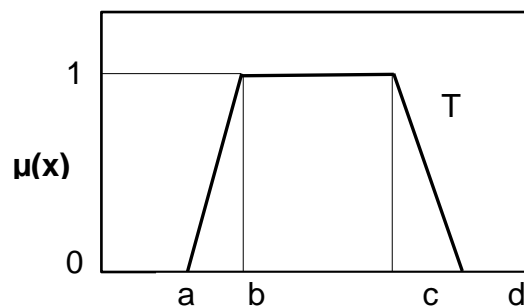


Figura 11. Función de membresía trapezoidal.



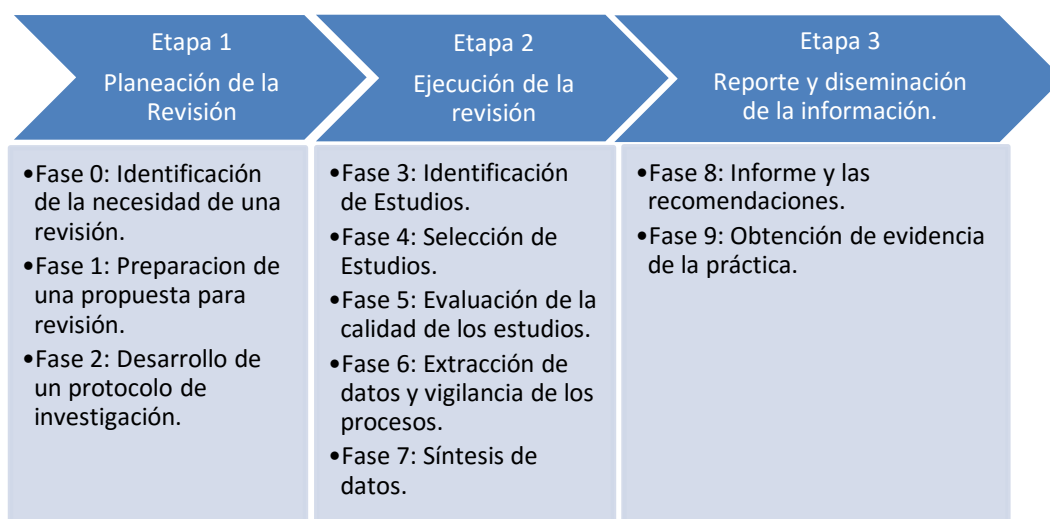
La función trapezoidal que es la más utilizada para medir la incertidumbre de las actividades debido a el intervalo b-c donde es muy probable que se encuentren el tiempo de seguridad de la actividad. La función de membresía se describe de la siguiente manera:

$$\mu(x) \begin{cases} [a, b]; \mu(t) = \frac{b-x}{b-a} \\ [b, c]; \mu(t) = 1 \\ [c, d]; \mu(t) = \frac{d-x}{d-c} \end{cases} \quad (4)$$

4. METODOLOGÍA:

De acuerdo con la necesidad de identificar métodos de estimación y gestión de amortiguadores en la gestión de proyectos por cadena crítica y con el deseo de obtener resultados con alto grado de confiabilidad, el presente estado de arte sigue la metodología propuesta por Tranfield, Denyer y Smart²¹ en la cual, se realizará un análisis y síntesis de la información obtenida, presentando de una manera ordenada los pasos para realizar la revisión sistemática de la literatura y presentar adecuadamente los resultados obtenidos. Básicamente un estado de arte consta de protocolos planificación e identificación de información, recopilación de información y evaluación de la calidad y pertinencia de ña misma para el tema de investigación y el reporte de resultados^{22 23}.

Figura 12 . Etapas de la revisión sistemática.



Fuente: Tranfield, Denyer y Smart.

²¹ TRANFIELD, David, DENYER, David y SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. En: British Journal of Management. (2003). Vol. 14, p. 207-222

²² TRANFIELD, Op. cit, p. 215

²³ THORPE, Richard. HOLT Robin. PITTAWAY Luke. MACPHERSON, Allan. Knowledge within small and medium sized firms: A systematic review of the evidence. En: International Journals of Managements Reviews. 2006. Vol. 7, No. 4. 257 – 281.

5. PLANEACIÓN DE LA REVISIÓN

5.1. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE UNA REVISIÓN

La técnica de cadena crítica para superar las incertidumbres que existen en un proyecto, se basa principalmente de los amortiguadores que se añaden al final de la cadena crítica y las no críticas. El punto clave es el tamaño del amortiguador, porque incluso mal dimensionamiento del amortiguador puede hacer que la filosofía de la cadena crítica se pierda²⁴.

Los métodos más conocidos y fáciles de utilizar para la estimación del tamaño de los amortiguadores son Cut and Paste (Copiar y pegar) propuesto por Goldratt²⁵ y RSEM (método del error de la raíz cuadrada) propuesto por Newbold²⁶. Pero el uso de la regla del 50% en Cut and Paste para el dimensionamiento amortiguador puede conducir a una sobreestimación grave del tamaño del búfer proyecto requerido y el RSEM no puede asegurar adecuadamente proyectos con pocas actividades²⁷. Debido a esto se evidencia la necesidad de realizar un documento que recopile metodologías de dimensionamiento de amortiguadores de proyectos que se ejecuten con los lineamientos de la filosofía de la cadena crítica.

²⁴ IRANMANESH, Hosein, MANSOURIAN, Fatemeh y KOUCHAKI, Samaneh. Critical chain scheduling: a new approach for feeding buffer. En: International Journal of Operations Management. (2016). Vol.25, No 1; p. 114–130.

²⁵ GOLDRATT, Op. cit.

²⁶ Newbold, Robert, Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints. Boca Raton: St. Lucie Press, (1998). p. 284.

²⁷ HERROELEN, Willy y LEUS, Roel. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. En: Journal of Operations Management. (2001). Vol. 19 No. 5; p. 559-577.

5.2. PREPARACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA REVISIÓN.

Teniendo en cuenta la investigación y análisis preliminar que se necesitó para la aprobación de este tema como propuesta de investigación, se determinaron los objetivos y el alcance que debe tener esta revisión sistemática con la cual, por medio de la lectura de material bibliográfico, se busca obtener los métodos de estimación y gestión de los amortiguadores que diversos autores proponen, observando cuales son su características y utilidad, con el fin de realizar una síntesis donde se puedan explorar a futuro diferentes temas de investigación que puedan ayudar al desarrollo del método de la cadena crítica en la administración de proyectos. Una vez establecidos los objetivos se procedió a conformar un equipo de revisión que tiene como integrantes a Eliana Marcela Peña Tibaduiza como directora y German David A. Suarez Bautista como investigador. Una vez conformado el equipo de revisión se elaboró la pregunta de investigación, ¿Cómo se determinan y gestionan los amortiguadores en los proyectos administrados a través de cadena crítica?

Posteriormente al planteamiento de la pregunta de investigación, se prosiguió a definir cuales palabras clave conformarían la ecuación de búsqueda. El proceso realizado para la selección de las palabras fue inmersión literaria preliminar, donde con el asesoramiento de la directora se determinaron las palabras y operadores boléanos que darían como resultado la ecuación de búsqueda.

5.3. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

Se presenta la ecuación de búsqueda (Ver Figura 13) y los criterios de inclusión y exclusión (ver Tabla 1), y posteriormente los criterios de calidad. Estos criterios sirvieron como base para desarrollar una revisión sistemática objetiva y que garantice que los resultados sean de calidad.

Figura 13. Etapas de la revisión sistemática.

("critical chain" buffer management) OR ("critical chain" sizing buffer) OR ("critical chain" buffer method) OR ("critical chain" estimate buffer) OR ("critical chain" determined buffer) OR ("critical chain" techniques buffer) OR ("critical chain" strategy buffer) OR ("critical chain" duration buffer) OR ("theory of constraints" buffer sizing) OR ("theory of constraints" buffer management)

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de Inclusión:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se incluyeron solo documentos que fueron publicados del año 2005 en adelante. 2. Se incluyeron solo documentos de tipo artículo. 3. Se incluyeron solo documentos en ingles. 4. Se incluyeron solo documentos de texto completo.
Criterios de Exclusión:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se excluyeron artículos que no tienen relación con el método de cadena crítica, su estimación o la gestión de sus amortiguadores en administración de proyectos. 2. Se excluyeron documentos publicados a partir del 10 de febrero de 2016. 3. No cumpla con los criterios de inclusión.

Criterios de calidad:

- Proporcione un aporte teórico significativo relacionado con los factores que promueven u obstaculizan la estimación y gestión de amortiguadores en la administración de proyectos por cadena crítica.
- Identifique y describa modelos para determinar amortiguadores en la administración de proyectos por cadena crítica.
- Describa metodologías que mejoren la eficiencia administración de proyectos por cadena crítica.

6. EJECUCIÓN DE LA REVISIÓN

La ejecución de la revisión fue la etapa donde se realizó la identificación, selección y evaluación teniendo coherencia con los criterios de inclusión, exclusión y calidad respectivamente, de los documentos científicos referente a la investigación. Posteriormente se procede a la selección y síntesis de la información necesaria para la elaboración de este documento.

6.1. IDENTIFICACIÓN DE ESTUDIOS

La fase de investigación de estudios se realizó haciendo uso de las bases de datos a las cuales está afiliada la Universidad Industrial de Santander, de las que se seleccionaron las que se consideraron las más apropiadas según el tema a investigar.

- ProQuest
- Scopus
- ScienceDirect
- Engineering Village

6.2. SELECCIÓN DE LOS ESTUDIOS

Para la búsqueda realizada en cada una de las bases de datos se aplicaron cada uno de los criterios de inclusión por medio de los filtros de cada base de datos, obtenido como resultado los datos de la Tabla 2.

Tabla 2 . Numero de artículos de cada base de datos.

Nombre de la base de datos	Numero de articulos
Scopus	539
ProQuest	422
Science Direct	242
Engineering Village	141
Total	1.344

Posteriormente se procedio a aplicar cada uno de los criterios de exclusión por medio de la lectura de titulos y resumen de cada documento, reduciendo su numero a 126.

“Sólo los estudios que cumplen con todos los criterios de inclusión especificada en el protocolo de revisión y ninguno de los criterios de exclusión tiene por qué ser incorporado en la revisión.”²⁸

6.3. EVALUACION DE LA CALIDAD DE LOS ESTUDIOS

Teniendo en cuenta la depuracion realizada en la seccion anterior y aplicando los criterios de calidad se obtiene un total de 64 artículos adecuados para la revisión. La tabla 3 evidencia la cantidad obtenida por cada una de ellas.

²⁸ TRANFIELD, Op. cit, p. 215

Tabla 3. Numero de artículos seleccionados de cada base de datos.

Fuentes Bibliográficas	Número de Artículos
Scopus	18
ProQuest	14
Science Direct	11
Engineering Village	21
TOTAL	64

6.4. EXTRACCIÓN DE DATOS Y VIGILANCIA DE LOS PROGRESOS

La extracción de datos se realizó con la ayuda del software *VantagePoint*, el cual permite obtener información como autores, fechas de publicación, palabras clave, entre otros datos. Adicionalmente este software es capaz de crear gráficas de correlación y adunas con los cuales se puede analizar de una manera más cómoda y visual la relación entre los autores y entre palabras clave. El Software Microsoft Excel fue utilizado en algunas ocasiones para crear tablas y extraer información de forma manual.

6.5. SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN

La información encontrada proviene de la extracción de datos de los documentos seleccionados, cumpliendo con los criterios propuestos para el desarrollo de esta revisión y se presenta en el capítulo 7.

7. REPORTE Y DISEMINACIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

El análisis bibliométrico comprende artículos desde enero de 2005 hasta febrero 10 de 2016, donde se analizaron campos como publicaciones por año, autores, palabras clave, revistas, artículos más citados.

Como se observa en la Figura 14, la investigación respecto a la estimación y gestión de los amortiguadores no cumple con una tendencia exponencial creciente, pero con el paso del tiempo se presenta un aumento.

Figura 14. Numero de Publicaciones por Año.

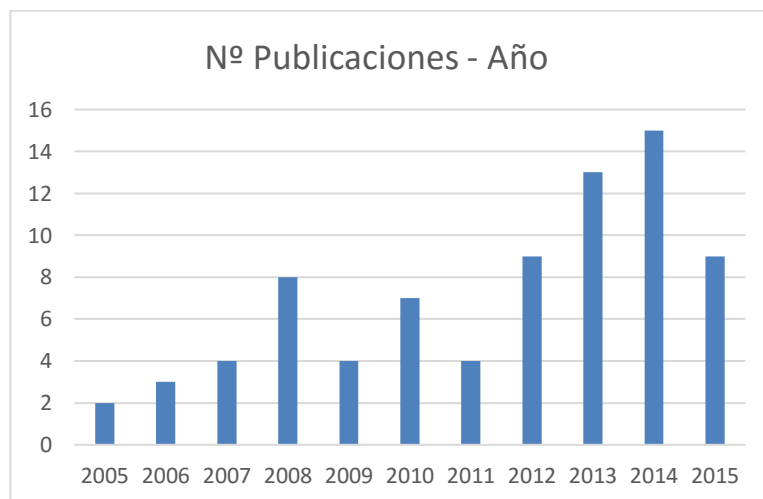
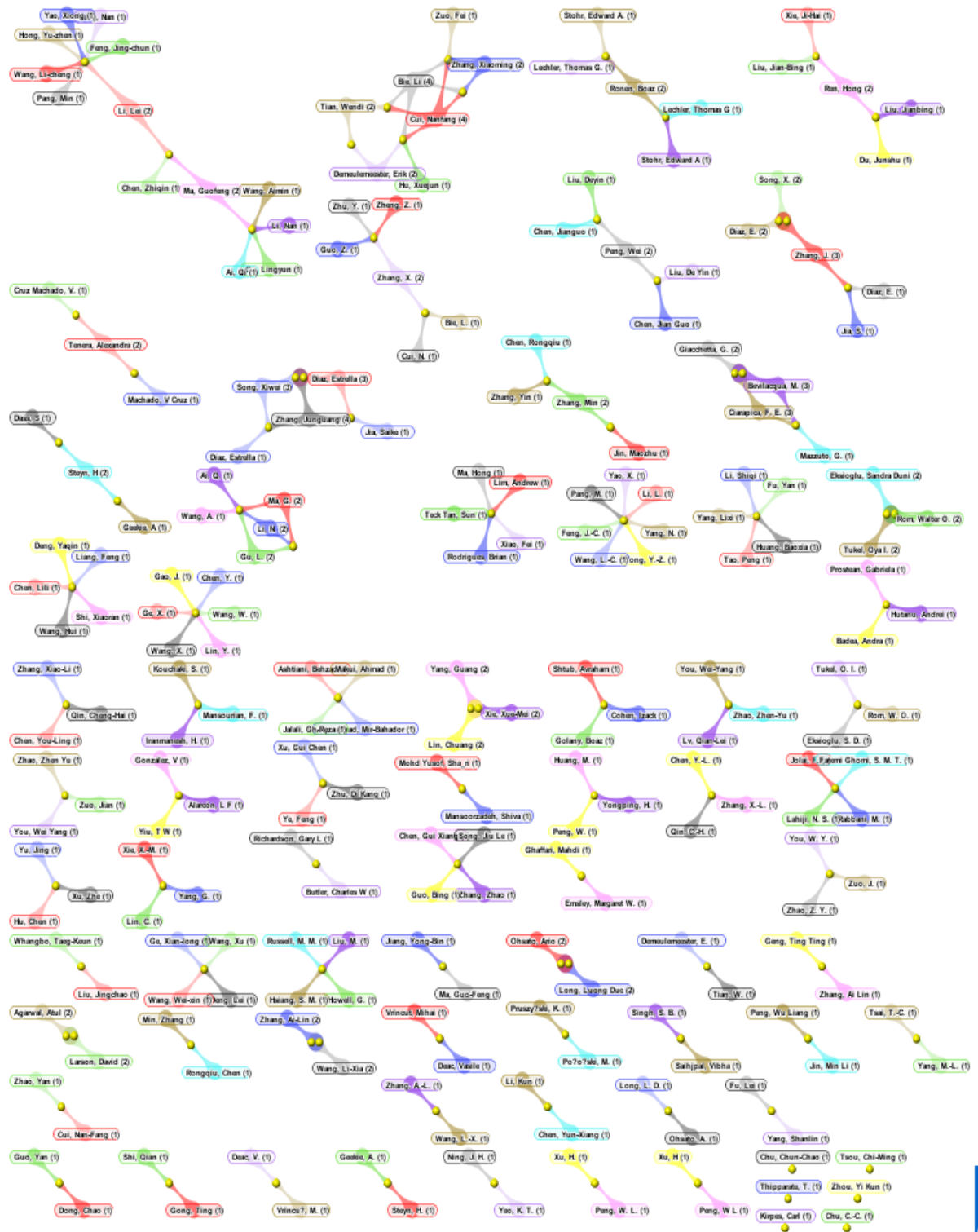


Figura 15. Aduna de autores.



Fuente: VantagePoint



La Figura 15. muestra que la mayoría de los artículos son realizados por tres o más personas, de las cuales muy pocas de estas realizan un segundo artículo relacionado, no obstante, también se encontró autores que publican más de un artículo, demostrando que siguen investigando sobre el tema. Los siguientes son los autores que más publicaciones han realizado:

Tabla 4. Autores con mayor número de publicaciones.

Autor	Nº de publicaciones
LI Bie	3
NANFANG Cui	3
ESTRELLA Diaz	3
GUOFENG Ma	3
WULIANG Peng	3
ZHANG Junguang	3
ZHANG Min	3

Figura 16. Revistas con mayor número de publicaciones.

	# Records	# Instances	Publisher
1	10	10	IEEE Computer Society
2	6	6	Trans Tech Publications Ltd
3	5	5	Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Soci
4	4	4	Elsevier
5	4	4	SAGE Publications Ltd
6	3	3	American Society of Civil Engineers (ASC
7	3	3	CIMS
8	3	3	Inderscience Enterprises Ltd
9	3	3	Springer Verlag
10	2	2	Asian Network for Scientific Information
11	2	2	Asian Network for Scientific Information (
12	2	2	Institute of Industrial Engineers-Publisher
13	2	2	Jordan Whitney Enterprises, Inc
14	2	2	South African Institute for Industrial Engin
15	2	2	Springer Science & Business Media
16	2	2	Taylor and Francis Ltd

Fuente: VantagePoint

Con respecto a las fuentes de información, de la Figura 16. podemos observar cuales son las revistas que más han publicado artículos relacionados a la gestión y estimación de amortiguadores donde sobresalen IEEE Computer Society, Trans Tech Publications Ltd y Elsevier.

Por otro lado, en la Figura 17. Se puede observar una lista de los artículos más citados por los autores:

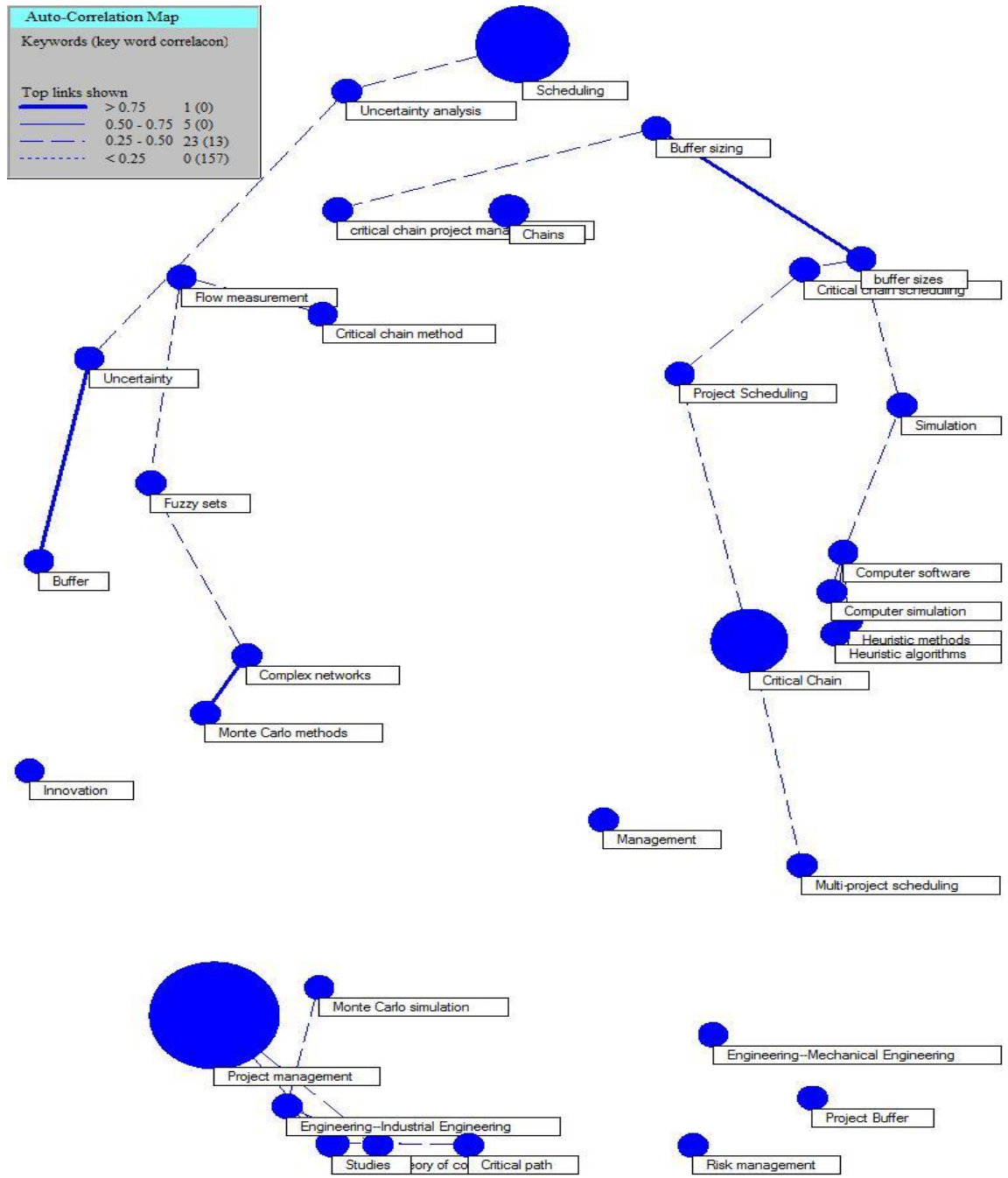
Figura 17. Artículos más citados por los autores.

	# Records	# Instances	References (Title)
1	17	17	On the merits and pitfalls of critical chain scheduling
2	15	15	An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling
3	14	14	Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty
4	8	8	Critical chain: The theory of constraints applied to project management
5	6	6	A new heuristic for resource-constrained project scheduling in stochastic networks using critical chain concept
6	6	6	Critical chain and risk analysis applied to high-risk industry maintenance: A case study
7	5	5	An investigation into the fundamentals of critical chain project scheduling
8	5	5	Application of innovative critical chain method for project planning and control under resource constraints and uncertainty
9	5	5	Buffer sizing and critical chain project management
10	5	5	Critical chain project management improves project performance
11	5	5	Estimation of project buffers in critical chain project management
12	5	5	Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials
13	4	4	A critical chain project scheduling method based on a differential evolution algorithm
14	4	4	A critical look at critical chain project management
15	4	4	Critical chain based approach for resource-constrained project scheduling
16	4	4	Critical chain project scheduling: Do not oversimplify
17	3	3	A buffer sizing approach in critical chain scheduling with attributes dependent
18	3	3	A new approach for buffer sizing in critical chain scheduling
19	3	3	An improved approach for project buffer sizing and evaluation
20	3	3	An overlapping-based process model for managing schedule and cost risk in product development
21	3	3	Application of a technique for research and development program evaluation
22	3	3	Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling
23	3	3	Fuzzy logic approach for activity delay analysis and schedule updating
24	3	3	Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis
25	3	3	Integrated methodology to design and manage work-in-process buffers in repetitive building projects
26	3	3	Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain
27	3	3	Project management applications of the theory of constraints beyond critical chain scheduling
28	3	3	Quantifying buffers for project schedules

Fuente: VantagePoint

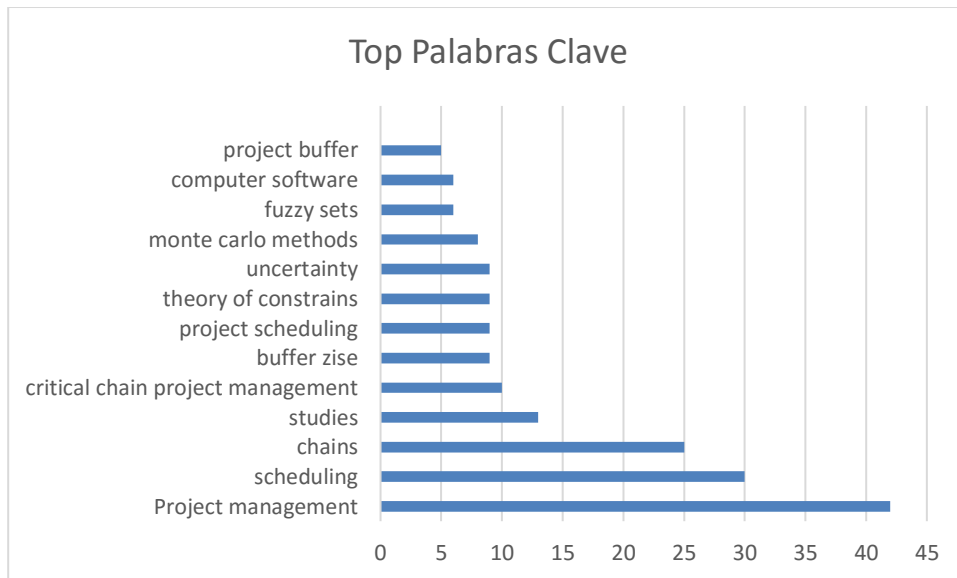
De la investigación realizada en las bases de datos se pudieron obtener cerca del 70 % de estos artículos, los cuales pueden considerarse “hot papers” y su contenido es de gran importancia, demostrado con el número de referencias que otros autores hacen de estos. De estos artículos se pueden destacar “On the merits and pitfalls of critical chain scheduling”, “An investigation of buffer sizing

Figura 19. Correlación entre palabras clave.



Fuente: VantagePoint

Figura 20. Top Palabras Clave.



En la Figura 18, se pueden observar las palabras claves principales, encontradas en análisis bibliométrico que fue realizado a los artículos utilizados en el presente proyecto, resaltando palabras clave como Project Management, scheduling, Critical Chain, las cuales son la base de este estado de arte. Este análisis permite validar la ecuación de búsqueda utilizada e identificar algunas palabras claves que no fueron consideradas en el contenido de la ecuación, como por ejemplo scheduling la cual es ampliamente utilizada por los autores o Uncertainty que también es muy utilizada, aunque en menor cantidad.

En la Figura 19, se evidencia la correlación que existe entre las palabras clave principales, donde se ve que Buffer y Uncertainty, Buffer Sizing y Buffer sizes, Complex Networks y Monte Carlo Methods, tienen una relación fuerte entre ellas, es decir, siempre que se habla de un tema el otro está presente en ese contexto.

Por último, en la Figura 20, se observa que gran parte de los artículos están enfocados en la gestión de proyectos por cadena crítica, donde resaltan temas importantes como la incertidumbre, el cronograma del proyecto, ambientes

difusos, simulaciones y software, entre otros tópicos. Este análisis actúa como una breve introducción a los temas que serán tratados a lo largo del proyecto.

7.2. REVISIÓN DE LITERATURA

7.2.1. Estimaciones con base en los métodos tradicionales de gestión de proyectos: Uno de los inconvenientes del método de Cortar y Pegar de Goldratt era su falta de análisis matemático²⁹. Debido a esto, Newbold desarrollo el método de RSEM basado en la suposición de que las actividades son independientes entre ellas y el teorema del límite central se podría utilizar³⁰.

Herroelen et al³¹, realiza uno de los primeros estudios donde se analiza de una manera general todos los conceptos de cadena crítica, entre ellos los métodos de tamaño del amortiguador. En su estudio realiza un experimento simulando con un software comercial diferentes proyectos en los cuales utiliza y compara los métodos de Cortar y Pegar y el RSEM. Los resultados del experimento indican que el método Cortar y Pegar sobre estima los proyectos con muchas actividades, debido a que el amortiguador crece linealmente, por otro lado, las dos desviaciones estándar que fundamentan el RSEM son insuficientes cuando el proyecto es extenso. Los proyectos con pocas actividades fueron excluidos debido a que carecen de fundamento estadístico. Tomando este estudio como referencia muchos autores investigaron diferentes alternativas para solucionar las carencias que tiene la cadena crítica en lo referente a los métodos de tamaño de amortiguadores.

²⁹ ASHTIANI, Behzad et al. A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling. En: International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (2007). Vol. 1, No 4; p. 137 – 141.

³⁰ NEWBOLD Op. cit. 284

³¹ HERROELEN, Op. cit. p. 564.

Tenera y Cruz³² realizan un estudio en el cual proponen un nuevo método de dimensionamiento de amortiguadores teniendo en cuenta las simulaciones Monte-Carlo. Proponen que el amortiguador sea calculado como la diferencia entre el 95 percentil de la duración del proyecto simulado por Monte-Carlo y la duración del proyecto programado inicialmente. El 95 percentil es con base al nivel de confianza de la simulación. El método fue comparado con Cortar y Pegar y RSEM por simulación y comprobado en un caso de estudio de construcción con resultados favorables respecto al tamaño del proyecto y su finalización en el tiempo estipulado.

Por otro lado Ashtiani et al³³, propone un nuevo enfoque al método RSEM basándose en las propiedades de la distribución logarítmica, en el cual, realiza una simulación donde propone un factor corrección a la desviación estándar de cada actividad . Este factor (ψ_α) es el número de desviaciones estándar entre la media de la función lognormal de la actividad y el $\alpha\%$ quintil de ella. Para esto asigna un nivel de riesgo entre 0.1-0.5 donde 0.1 es un riesgo bajo y 0.5 un riesgo alto, este valor debe ser otorgado por el gerente de proyecto teniendo en cuenta su experiencia. La investigación demuestra que el factor de corrección es constante para diferentes valores de riesgo independientemente de la cantidad de actividades del proyecto. El factor se encuentra entre un rango de 1.266 y 1.317 así que lo promedian y obtienen el valor de 1.3.

$$U_i = \frac{S_i - d_i}{1.3} \quad (5)$$

³² TENERA, Alexandra y MACHADO, V. C. Critical Chain Project Management: A new approach for time buffer sizing. (2007). Vol 1, p. 475–481

³³ ASHTIANI, Behzad *et al.* A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling. En: International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (2007). Vol. 1, No 4; p. 137 – 141.

$$\textit{Tamaño del amortiguador} = 2\sigma = 2 \sum_{i=1}^n (U_i^2)^{1/2} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta el método PERT, Jian-Bing, Hong y Ji-Hai³⁴ proponen la idea de describir la duración de las actividades por medio de la estimación de tres puntos, en la cual por juicio de expertos de los miembros del equipo del proyecto estiman la duración más probable, la duración optimista y la duración pesimista para cada actividad. Según la posición que ocupe la actividad en cada cadena, consideran que la incertidumbre de la actividad tiene un efecto mayor en el amortiguador de la cadena por lo cual determinan un peso para cada actividad según la posición en que se encuentre. De esta manera proponen el siguiente método de estimación de los amortiguadores:

$$\textit{Tamaño del amortiguador} = \sum_{i=1}^n (b_i - m_i) * \beta_i * \alpha_i \quad (7)$$

$$\beta = \frac{m - a}{b - a} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{d}{L} \quad (9)$$

Donde:

a es la estimación optimista, **b** es la estimación pesimista, **m** es la estimación más probable, β_i es el coeficiente que expresa la elasticidad o distribución de duración de la actividad *i*, α_i representa el peso de la incertidumbre de la actividad según su posición, **d** es la distancia desde el inicio del proyecto hasta la mitad de la duración de la actividad, **L** representa la duración del proyecto.

³⁴JIAN-BING, L. et al. Critical Chain Project Management Based Heuristic Algorithm for Multiple Resources-Constrained Project. En: International Seminar on Business and Information Management (2008), Vol 1, p. 330–335.

Continuando con la investigación con base en la consideración de la distribución lognormal como modelo que describe la duración de las actividades, Fallah, Ashtiani y Aryanezhad³⁵ consideran que para medir la incertidumbre de las actividades existen tres factores que pueden describir el comportamiento de la incertidumbre y el riesgo que representa para el proyecto. Esos factores son el coeficiente de variación, la curtosis y la asimetría. En la distribución lognormal con sesgo a la derecha, el valor de la media es mayor que el de la mediana, esta diferencia está relacionada con la varianza de tal manera que si la diferencia se incrementa la varianza también lo hace. Debido a que la varianza es el parámetro que le da la forma a la distribución lognormal proponen una escala fija en el cual este parámetro es el encargado de medir el riesgo de la actividad.

Para determinar el amortiguador de las cadenas, calculan tres indicadores cada uno de ellos multiplicados por la diferencia entre la media y la mediana. Estos son:

- ✓ **Curtosis * D**
- ✓ **Asimetría*D**
- ✓ **Coeficiente de Variación*D**

Dónde:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\mu} (\mathbf{x}) - \mathbf{mediana} (\mathbf{x}). \quad (10)$$

Ordenando los valores de mayor a menor siendo \mathbf{a}_1 el mayor y \mathbf{a}_3 el menor se calcula el amortiguador de la siguiente manera:

³⁵FALLAH, Mohammad *et al.* Critical chain project scheduling : utilizing uncertainty for buffer sizing. *En*: International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. (2010) Vol 3, No 3; p. 280–289.

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \frac{a_1 - a_2}{a_1 - a_3} * a_1 + \frac{a_2 - a_3}{a_1 - a_3} * a_2$$

Por otro lado, Liu y Whangbo³⁶, proponen realizar una adaptación de la técnica de PERT/CPM conocida como estimación de 3 puntos a la metodología de amortiguadores propuesta por CCPM. Se basan en el que el comportamiento de las actividades asemeja a una distribución normal, por lo cual utilizan la fórmula del valor z para estimar el amortiguador. Para estimar a duración de los tiempos de las actividades y la varianza en PERT se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$t_e = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6} \quad (11) \quad \sigma^2 = \left(\frac{t_p - t_o}{6}\right)^2 \quad (12)$$

Aseguran que la conocida formula de transformación Z nos puede describir el tiempo necesario para completar el 90% (Z= 1,29) del proyecto con un tiempo estimado t_e y una varianza σ^2 de la siguiente manera:

$$Z = \frac{T_s - T_e}{\sqrt{\sum \sigma^2_i}} \quad (13)$$

Donde:

T_s es el tiempo seguro necesario para terminar al menos 90% del proyecto, T_e es el tiempo estimado del proyecto y σ^2_i es la varianza de las i actividades.

³⁶LIU, Jingchao y WHANGBO, Taeg-Keun. A Study on the Buffer Sizing Method of CCPM Technique Using Statistical Analysis. En: Convergence and Hybrid Information Technology. (2012). p. 672-679.

Según CCPM el tiempo T_s puede ser expresado como $T_s=(T_e + PB)$ por lo cual el amortiguador del proyecto estaría determinado por:

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \sqrt{\sum Z * \sigma^2_i} \quad (14)$$

Adicionalmente, se propone realizar análisis estadístico de los trabajadores y las actividades en las que operan con el fin de determinar un Z en función de la productividad del trabajado y de su operación en las actividades.

7.2.2. Características y atributos del proyecto: Comúnmente se supone que detrás de los métodos de dimensionamiento de amortiguadores tradicionales, el 50% de la estimación segura corresponde a la variabilidad en la duración de la tarea. Sin embargo, Goldratt³⁷ afirma, el 50% no refleja necesariamente la variabilidad así debido a que la distribución de la duración de las tareas suele ser sesgada a la derecha.

Tukel et al³⁸ se dieron cuenta que era mayor el número de veces que las actividades excedían su duración planificada que las veces que terminaban antes. Por lo tanto, afirmaron que las actividades siguen una distribución lognormal y el tamaño del amortiguador debe tener una relación explícita con la duración de las actividades y la característica del proyecto.

³⁷ GOLDRATT, Op. cit.

³⁸ TUKEL, Oya, ROM,Walter y EKSIUGLU, Sandra. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. En: European Journal of Operational Research. (2006) Vol 172, p. 401-416.

Ellos observaron dos problemas fundamentales, el primero era que cuando la cantidad de cierto tipo de recurso utilizado por determinado tiempo está cerca de la capacidad total disponible de ese recurso, era más probable que se presenten retrasos en las actividades. El segundo problema era que cuando el número de tareas, así como el número de relaciones de precedencia entre las actividades aumentaba posiblemente ocurrirían demoras en el inicio de las actividades. Por lo cual la duración de los amortiguadores debería ser más larga que la calculada inicialmente.

Para resolver estos problemas ellos proponen dos métodos de estimación del tamaño de los amortiguadores los cuales tienen en cuenta esas características de los proyectos y la incertidumbre propia de las actividades y como en los métodos anteriores esto se refleja tanto en las cadenas de alimentación como en la cadena crítica.

El primer método que ellos proponen es el APRT (Proceso Adaptativo de Resource Tighness) el cual, por medio de un índice denominado RF (Factor de utilización del Recurso) indica la relación entre el consumo de cada recurso y su disponibilidad en un tiempo determinado.

$$RF(q) = (\sum_i^n r(i, q) * d_i) / T * Rav(q) \quad \text{para cada tipo de recurso } q \quad (15)$$

$$r^* = \max_q [RF(q)] \quad (16)$$

$$K = 1 + r^* \quad (17)$$

$$\text{Tamaño del amortiguador} = K * \sqrt{VAR_i} \quad (18)$$

Donde $r(i, q)$ representa el tipo de recurso q utilizado en la actividad i , d_i representa la duración de la actividad i , T representa la longitud de la cadena crítica, r^* representa el valor máximo de RF entre todos los recursos q , por

último, VAR_i representa la varianza del camino crítico o no crítico que conduce al amortiguador, teniendo en cuenta el teorema del límite central.

El segundo método conocido como ADP (Procedimiento adaptativo con densidad), posee un factor denominador complejidad de la red, el cual, es la relación entre el número total de actividades sobre el número total de relaciones de precedencia. De esta manera intenta solucionar el segundo problema.

Sea:

$$K = 1 + \left(\frac{TOTPRE}{NUMTASK} \right) \quad (19)$$

Donde $TOTPRE$ es el número total de relaciones de precedencia en la cadena y $NUMTASK$ es el número de actividades presentes en la cadena.

$$\text{Tamaño del amortiguador} = K * \sqrt{VAR_i} \quad (20)$$

Donde VAR_i es la varianza de la cadena crítica o no crítica teniendo en cuenta el teorema del límite central.

Por otra parte Yang et al ³⁹ realiza un experimento para comprobar la relevancia de tres atributos que considera son importantes a la hora de determinar el tamaño de los amortiguadores los cuales son la incertidumbre de las actividades, el número de actividades y la flexibilidad en la hora de inicio de las actividades. Para esto realiza una simulación con 36 escenarios de proyectos donde existen 3 tipos de incertidumbre (baja, media y alta), 6 diferentes cantidades de actividades en el rango de 1 a 50, y 2 tipos de flexibilidad (baja y alta), variando en cada uno de los factores antes mencionados y evaluando cada escenario por los métodos Cortar y pegar y RSEM.

El experimento concluye que cuando el número de actividades es mediano, los amortiguadores calculados por ambos métodos son demasiado pequeños para asegurar la terminación a tiempo del proyecto, mientras que si es alto RSEM no puede cubrir los posibles retrasos.

Además, en ambos métodos se comprobó que a mayor nivel de incertidumbre el proyecto se demora más tiempo en finalizar, pero que con un número pequeño de actividades ambos son capaz de estimar amortiguadores que contengan las demoras.

La flexibilidad de las actividades de la hora de inicio solamente tiene un pequeño impacto en el tiempo de finalización cuando se utiliza el Cortar y pegar, sin embargo, cuando se utiliza la RSEM y la cadena crítica que contiene gran número de actividades, que tiene un gran impacto en el tiempo de finalización. Esto se deduce del hecho de que el efecto cascada es relativamente débil

³⁹ YANG, Lixi, *et al.* A buffer sizing approach in critical chain scheduling with attributes dependent. En: International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, (2008). p. 1–4.

cuando el número de actividades es pequeño, por lo tanto, no tiene ningún impacto notable sobre la duración del proyecto, sin embargo, cuando el número de actividades aumenta el impacto del efecto cascada aumenta lo cual puede crear demoras que sobrepasen el tamaño del amortiguador.

La razón de que el número de actividades no tiene ningún impacto aparente sobre el tiempo de duración del proyecto es porque Cortar y pegar es que este aumenta el amortiguador de forma lineal, por lo cual, un proyecto con un gran número de actividades cuenta con un amortiguador más grande y cubre el impacto de las demoras de tiempo⁴⁰.

Teniendo en cuenta lo descubierto en la simulación, proponen un método para proyectos con baja flexibilidad en el tiempo de inicio de las actividades, en el cual teniendo como base el método RSEM tomando como tiempo de seguridad una duración que asegure el 90 por ciento de completar la actividad y la duración media de la actividad, un factor incertidumbre, un factor de flexibilidad y un factor que es igual a la resta de la duración del proyecto por Cortar y Pegar y por RSEM se propone un método de dimensionamiento del tamaño de los amortiguadores.

Xie et al⁴¹ proponen mejorar el método de RSEM teniendo en cuenta las necesidades del desarrollo de proyectos de software, para esto ellos identificaron cuales eran las características de los recursos que utilizaban que básicamente eran máquinas y personas. Consideran que el método de RSEM no es suficiente para darle seguridad a la fecha de terminación del proyecto, por lo cual ellos proponen un factor de ajuste el cual le va a proporcionar un incremento en el

⁴⁰ HERROELEN, Op. cit. p. 564.

⁴¹ XIE, Xue-mei, YANG, Guang y LIN, Chuang. Software development projects IRSE buffer settings and simulation based on critical chain. En: The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications. (2010). Vol 17, p. 100–106.

tamaño del amortiguador, teniendo en las características del proyecto como lo son el Resource Tighness y la complejidad de la red.

Para comprobar su método realizaron una simulación de Montecarlo modelando la duración de las actividades como una distribución lognormal, comparando entre RSEM, Cortar y pegar y IRSEM (mejora de RSEM), evaluando aspectos como estabilidad del proyecto y utilización del amortiguador. Por un lado, la estabilidad del proyecto del IRSEM no difiere mucho del RSEM, pero es mucho mejor que Cortar y Pegar; respecto a la utilización del amortiguador es significativamente mejor que el RSEM.

Goufeng, Lei y Zhiqin⁴², afirman la importancia de tomar en cuenta las características de los proyectos, tales el Resource Tighness y la complejidad de la red, además, como en métodos tradicionales como el método del camino crítico y PERT, consideran que es importante tener en cuenta cualquier tipo de evento que presente un riesgo para la duración de cada actividad, por lo cual ratifican que es necesario medir cada riesgo y determinar el peso o impacto de cada uno de ellos en la duración de cada actividad. Además, para definir la duración de las actividades utilizan la simulación de Monte-Carlo con estimaciones realistas y pesimistas. No obstante, las actividades están asumidas con un 95% de confiabilidad, por lo tanto, consideran que debe existir un factor que represente el riesgo asumido por el gerente de proyecto frente al 5% restante.

⁴² MA, Goufeng, LI, Lei y CHEN, Zhiqin. Research on the buffer sizing approach in critical chain scheduling in perspective of flexible management. En: *Advances in Intelligent and Soft Computing*. (2012). Vol 143 , p. 61–68.

Deyin et al⁴³ están de acuerdo con los atributos planteados por Tukul et al⁴⁴, sin embargo, encontraron que el método APD no provee una efectiva y precisa medida de la incertidumbre de los proyectos luego de simularlos. Por lo cual proponen una nueva medida de complejidad de la red teniendo en cuenta conceptos de la teoría de grafos y de la teoría de la información.

Un diagrama de red según la teoría de grafos se puede describir como $G(V, E)$ donde V representa los vértices o nodos y E representa las aristas o conexiones entre vértices. Se define d_i como el grado de la actividad i que es el valor de todas las relaciones o arista que posee la actividad i . Entonces podemos obtener el factor de importancia I_i de la actividad i de la siguiente manera:

$$I_i = \frac{d_i}{\sum_i^N d_i} \quad (21)$$

Según la teoría de la entropía si el factor de importancia de todas las notas es aproximadamente igual, podemos creer que la red es más caótica, por lo tanto, el valor de entropía es más grande; por el contrario, se le dará la entropía más pequeña, si hay algunas notas clave con bajo grado de importancia en la red ⁴⁵. Del mismo modo, el proyecto tiene más probabilidades de éxito, si el gerente de proyectos presta más atención en las tareas clave. Por lo general es difícil imaginar si todas las actividades son igualmente importantes o cuales son las más importantes.

⁴³ LIU Deyin, CHEN Jianguo y PENG Wei. New Buffer Setting Method Based on Activity Attributes in Construction Engineering. En: Applied Mechanics and Materials. (2012). Vol 174-177, p. 3274–3281.

⁴⁴ TUKEL Op. cit p.401-416

⁴⁵ BATTAIL, G. Applying semiotics and information theory to biology: a critical comparison. En: Biosemiotics. (2009). Vol. 2(3). P. 303–320

Teniendo el concepto de la entropía lo utilizan para realizar una medición de la complejidad en la red de la siguiente manera:

$$E = - \sum_{I=1}^N I_i \ln(I_i) \quad (22)$$

$$E_{min} = - \sum_{I=1}^N \frac{\ln 4(N-1)}{2} \quad (23)$$

$$E_{max} = - \sum_{I=1}^N \frac{1}{N} \ln\left(\frac{1}{N}\right) \quad (24)$$

Donde la entropía máxima se alcanza cuando los factores de importancia son homogéneos entre las N actividades, y la mínima cuando la red es asimétrica.

Debido a que la entropía está relacionada con el número de actividades N, definieron la entropía estándar (SE) de la siguiente manera:

$$SE = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (25)$$

Para medir la efectividad y precisión de la medida de la entropía estándar se realizó una simulación por medio de *Crystal Ball* en más de 31 proyectos teniendo la desviación estándar de los proyectos como punto de referencia para la comparación entre SE y el APD.

Se analizó la correlación de SE y la desviación estándar obteniendo un alto nivel correlación positiva, mientras que la correlación entre APD y la desviación estándar fue prácticamente nula. Además también se compararon por medio del coeficiente R^2 con lo cual se puede explicar que cerca del 60% del crecimiento de SD se puede explicar por la varianza de SE y solo el 2.5% por APD. Debido a los resultados se considera que SE es una mejor medida para el coeficiente de complejidad de la red.

El método propuesto para el dimensionamiento del amortiguador tiene en cuenta el coeficiente de Resource Tighness propuesto en ADP, el coeficiente de entropía estándar, y un coeficiente de preferencia del riesgo, el cual es subjetivo según las preferencias del gerente de proyecto. Tomando como referencia el método RSEM se propone este método de dimensionamiento del amortiguador:

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \sqrt{(1 + \beta * SE) * \sum_{i=1}^N (1 + \alpha_i) * \sigma_i^2} \quad (26)$$

Donde:

β = Preferencia del riesgo, SE = entropía estándar, α_i = Resource Tighness,
 σ_i^2 = varianza de la actividad i

Por otra parte, Jing et al ⁴⁶ considera que el factor de utilización de los recursos propuesto por Tukul et al ⁴⁷ no es congruente con la práctica, debido a que en la vida real las actividades pueden usar una variedad de recursos para el

⁴⁶ JING Yu, ZHE Xu y CHEN Hu .Buffer sizing approach in critical chain project management under multiresource constraints. En: International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. (2013). 3, 71–75

⁴⁷ TUKEL Op. cit p.401-416

desarrollo de una misma actividad. Es por eso que realizaron un estudio en el cual tienen en cuenta el Resource Tighness a nivel multi-recursos.

$$R_i = \sum_k q_{ik} * w_k \quad (27)$$

$$q_{ik} = \frac{r_{ik}}{R_k}, \quad (28)$$

$$w_k = \frac{r_{\bar{k}}}{R_k}, \quad (29)$$

Donde:

R_i es el el factor de impactor en los recursos de la actividad i, q_{ik} es la utilización del todo recurso k en la actividad i, r_{ik} es el consumo que hace del recurso k la actividad i, R_k es la disponibilidad del recurso k, w_k es la restricción del recurso k que se define como la demanda promedio del recurso k de todas las actividades ($r_{\bar{k}}$) sobre la disponibilidad R_k .

De tal manera que para calcular cada amortiguador de alimentación proponen la ecuación 30:

$$Tamaño\ del\ FB = \sqrt{\sum_i ((1 + R_i)\sigma_i)^2} \quad (30)$$

En la cual σ_i representa la diferencia T_{90} y T_{50} es decir la sobreestimación de cada actividad.

Sin embargo, existen ocasiones en el cual el tiempo de holgura es menor que el amortiguador por lo cual existe el riesgo de retraso en las cadenas de alimentación al punto que puede afectar la cadena critica. Por lo tanto, se propone utilizar como amortiguador de alimentación el menor valor entre el tiempo de holgura de la última actividad de la cadena de alimentación y el amortiguador de alimentación calculado por medio de la ecuación 30, donde en el caso en que se tome el tiempo de holgura sea el menor, la diferencia entre los dos será agregada al amortiguador del proyecto.

En las ecuaciones 31 y 32 se puede ver como proponen calcular el amortiguador del proyecto.

$$\text{Tamaño del FB} = \sqrt{\sum_i ((1 + R_i)\sigma_i)^2} + \sum t_i \quad (31)$$

Donde:

$$t_i \begin{cases} 0, & \text{amortiguador}_i \leq \text{holgura}_i \\ \text{amortiguador}_i - \text{holgura}_i, & \text{amortiguador}_i > \text{holgura}_i \end{cases}$$

Russell et al ⁴⁸, realizan una investigación enfocada a los proyectos de construcción sobre los la causas que producen incertidumbre en la duración de los proyectos y por el cual es necesario tener amortiguadores de tiempo. Encontró 47 diferentes factores que influyen en la duración de los proyectos, los cuales categorizo de 9 formas (características del proyecto, prerrequisitos del trabajo, método de trabajo, fuerza laboral, equipo y herramientas, materiales, condiciones del sitio de trabajo, flujo de información y gestión, clima). Estos factores fueron evaluados respecto a su frecuencia y a su severidad, mostrando

⁴⁸ RUSSELL, Marion *et al.* Application of Time Buffers to Construction Project Task Durations. En: American Society of Civil Engineers. (2013). Vol, 139 No 10; p. 04013008

la mayoría de las características del proyecto como fuentes principales de las incertidumbres que afectan la fecha de finalización de los proyectos.

Ma et al⁴⁹, proponen un interesante método de dimensionamiento de amortiguadores en el cual contempla 5 factores que son importantes en proyectos de construcción. Este método se basa en el principio de estar consciente de las incertidumbres que rodean al proyecto. Para esto ellos proponen realizar un análisis PEST (político, económico, social y tecnológico), una herramienta ampliamente utilizada para evaluar factores externos y macro ambientes en los que viven las organizaciones. Sugieren que cada aspecto sea evaluado en la escala de 0 a 1, donde el valor del coeficiente de incertidumbre del ambiente (EU) se puede determinar de la siguiente forma:

$$EU = \begin{cases} 0,9 & \sum_{i=1}^4 \mu_i \geq 3 \\ 1 & 1,5 \leq \sum_{i=1}^4 \mu_i \leq 3 \\ 1,1 & \sum_{i=1}^4 \mu_i \leq 1,5 \end{cases} \quad (32)$$

Valores de EU pueden ser modificados según lo dicte las experiencias o el equipo de trabajo del proyecto lo considere.

⁴⁹ MA, Goufeng, et al. Improved Critical Chain Project Management Framework for Scheduling Construction Projects. En: Journal of Construction Engineering and Management. (2014). Vo 140, No 12, p. 140.

También consideran el factor de flexibilidad de la actividad (AF) el cual Yang et al⁵⁰ comprobó que actividades con menos flexibilidad son menos propensas a terminar a tiempo. Por lo cual definen la variable de flexibilidad f_i como $f_i = TF_i \ln TF_i$ según la teoría de la entropía. Donde TF_i se refiere al tiempo de holgura de la actividad i .

$$AF = \begin{cases} 1,1 & 0 \leq f_i < f' \\ 1 & f' \leq f_i \leq f'' \\ 0,9 & f'' < f_i \end{cases} \quad (33)$$

Los valores de f' y f'' son determinados según el juicio de los expertos que conforman el equipo del proyecto.

Los otros tres factores son complejidad de la red, Resource Tighness y preferencia al riesgo, factores presentados previamente por Tukul et al⁵¹ y Newbold⁵².

Por lo tanto, el método de dimensionamiento de amortiguador que propusieron se muestra a continuación:

$$\text{Tamaño del amortiguador} = EU * RP * AC * \left\{ \sum_i^n ((1 + RT) * AF_i * \sigma_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (34)$$

⁵⁰YANG, Lixi, Op..cit

⁵¹ TUKEL Op. cit p.401-416

⁵² NEWBOLD Op. cit. 284

Teniendo en cuenta un cronograma establecido por medio de los métodos CPM/PERT Zhang y Geng⁵³ realizan un estudio donde proponen atributos para el dimensionamiento de amortiguadores con base en el método de estimación tradicional de los tres puntos. Afirman que las actividades siempre están sujetas a riesgos los cuales muchas veces son causados por el comportamiento humano, como lo explica Goldratt⁵⁴ con el síndrome del estudiante y la ley de Parkinson, por lo tanto, es responsabilidad del gerente de proyecto analizar las actividades a profundidad y evitar realizar estimaciones conservativas que den como resultado una pérdida de recursos como tiempo y dinero. Para esto tendrán en cuenta características de los proyectos como la complejidad de red (A_i), importancia que representa la actividad en el amortiguador (ρ_i) el cual se representa como un coeficiente entre 0 y 1 estimado por juicio de expertos, riesgo de retraso de la actividad y preferencia al riesgo del gerente de proyecto (δ) expuesto por Newbold⁵⁵.

Para evaluar el riesgo que tiene el proceso en demorarse, se utiliza la estimación de tres puntos (a la duración optimista, m la más probable y b la pesimista) donde β representa el riesgo de que la actividad se retrase, y se obtiene de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{m - a}{b - a} \quad (35)$$

⁵³ ZHANG Ailin, GENG TingTing. Study on the Schedule Management Methods of Projects Based on Critical Chain Technology. Applied Mechanics and Materials, (2014). Vols 488-489, p. 1454–1457.

⁵⁴ GOLDRATT, Op. cit

⁵⁵ NEWBOLD, Op. cit

Para determinar el tamaño de los amortiguadores proponen la siguiente ecuación:

$$\textit{Tamaño del amortiguador} = \sum \rho_i(t_i - T_i)(A_i + \beta_i)(\delta \pm 1) \quad (36)$$

Donde t_i representa la duración de la actividad sobreestimada y T_i representa la duración sin sobreestimación. Los signos de la preferencia al riesgo del gerente de proyecto dependen del ε . $\varepsilon \leq 0.5$ el signo es positivo, de lo contrario es negativo.

Zhang et al ⁵⁶ no están de acuerdo en que la complejidad de la red deba ser un factor de ajuste para el tamaño del amortiguador del proyecto. De hecho, la complejidad de la red no afecta a la independencia de la duración de la actividad. El supuesto de independencia de la actividad se refiere principalmente a la independencia de la duración de las actividades, y el número de actividades no afecta ni a las relaciones lógicas ni de la independencia entre la duración de las actividades.

El retraso de la actividad predecesora no afectará a la duración de la actividad sucesora. Por ejemplo, si la actividad predecesora se retrasa por 10 días, la hora de inicio de la actividad sucesora también será diferido durante diez días, pero su duración se mantendrá sin cambios. Por lo tanto, la complejidad de la red, no afecta a la independencia entre las duraciones de las actividades.

⁵⁶ZHANG Janguang, SONGA Xiwei y DÍAZ Estrella. Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. En: *European Journal of Operational Research*. (2016). Vol 248 No 1; p. 174–182.

Por otro lado, están en desacuerdo en que el Resource Tighness se determine en razón del número de recursos requeridos sobre el disponible, debido a que, si cantidad de los recursos es la adecuada, el progreso el proyecto no se ve afectado por los recursos y no es necesario ajustar el amortiguador.

Consideran que hasta ahora solo se ha tenido en cuenta el Resource Tighness físico (Materiales, Equipo, etc.) y no se ha tenido en cuenta los recursos de información los cuales son los que producen la independencia entre las actividades.

Proponen un método de dimensionamiento basado en Resource Tighness integral el cual tiene en cuenta los recursos físicos y de información.

Proponen determinar un valor crítico para la cantidad de recursos q que debe existir, con lo cual, de tenerse una cantidad de recursos mayor a la del valor crítico del Resource Tighness desaparezca para ese recurso en esa actividad. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \alpha_i = \max_q[RF(q)], & Rav(q) \leq \alpha_q \\ \alpha_i = 0, & Rav(q) > \alpha_q \end{cases} \quad (37)$$

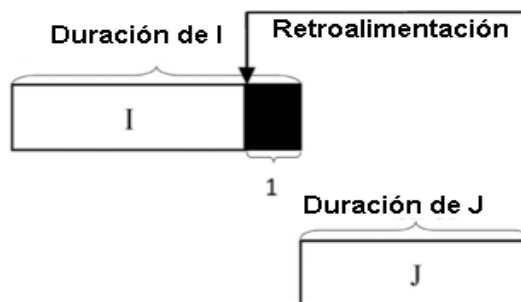
$$RF(q) = \sum_i^n r(i, q)/Rav(q) \quad (38)$$

Donde:

α_i = Resource Tighness físico, $RF(q)$ = eficiencia de la utilización del recurso q , $r(i, q)$ = utilización del recurso q en la actividad i , $Rav(q)$ = disponibilidad del recurso q , α_q = límite del recurso q en generar Resource Tighness.

Por otro lado, el Resource Tighness de información se enfoca en el retrabajo que se realiza al realizar retroalimentación o transmisión de información entre actividades sucesivas. Existen dos flujos de información entre actividades del proyecto, cuando están superpuestas y cuando no. Cuando no están superpuestas la información viaja al finalizar cada actividad, siendo el final de la primera actividad la transmisión de información y la finalización de la segunda actividad la retroalimentación de la primera. Cuando están superpuestas es más complejo debido a que durante la ejecución de la primera actividad se presenta transmisión y retroalimentación de información, lo cual de eso depende el retrabajo de la segunda actividad⁵⁷. En las Figuras 21, 22, 23, se pueden ver los flujos de información entre actividades del proyecto.

Figura 21. Retrabajo producido por retroalimentación sin superposición

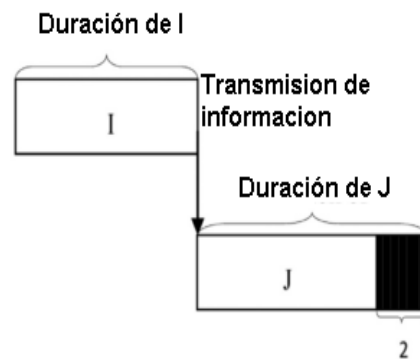


Fuente: Zhang et al ⁵⁸

⁵⁷ YANG, Q et al. An overlapping-based design structure matrix for measuring interaction strength and clustering analysis in product development project. IEEE Transactions on Engineering Management. (2014). Vol. 61, No 1; p. 159–170.

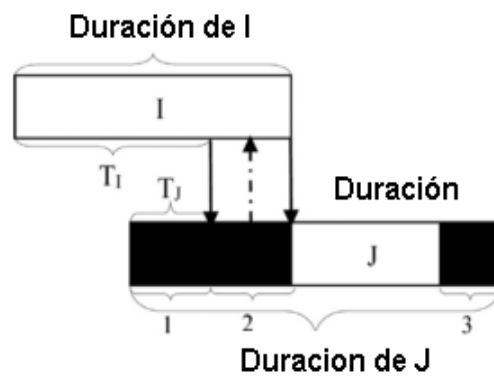
⁵⁸ ZHANG Junguang, SONG Xiwei y DÍAZ Estrella. Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. En: European Journal of Operational Research. (2016). Vol 248 No 1; p. 174–182.

Figura 22. Retrabajo producido por transmisión de información sin superposición



Fuente: Zhang et al⁵⁹

Figura 23. Retrabajo producido en superposición



Fuente: Zhang et al⁶⁰

Por medio de dos matrices DSM (Design Structure Matrix) se representan la información de salida y entrada entre las actividades relacionadas. Una matriz

⁵⁹ Zhang et al Op, cit.

⁶⁰ Zhang et al Op, cit.

mide la probabilidad de que ocurra retrabajo, la otra matriz mide la intensidad del retrabajo, es decir un porcentaje de la duración de la actividad.

El retrabajo puede lo expresan por medio de la ecuación (37):

$$Dr_i = d_i * RP(i, j) * RI(i, j) \quad (37)$$

$$Dr_i = ((d_i - T_i) + T_j) * RP(i, j) * RI(i, j) \quad (38)$$

Donde Dr_i representa la duración del retrabajo en la primera actividad i , d_i es la duración de la actividad i , es $RP(i, j)$ es la probabilidad de que ocurra retrabajo entre la actividad i y la j , $RI(i, j)$ es el porcentaje de retrabajo ocurrido entre i y j . T_i y T_j tiempo de transmisión y retroalimentación cuando ocurre superposición en las actividades.

Una vez determinado el tiempo de retrabajo esperado de retrabajo proceden a calcular el Resource Tighness de información el cual es la relación entre la total de la actividad donde se incluye el retrabajo estimado y la duración de la actividad sin retrabajo como se observa en la ecuación 39.

$$\beta_i = \frac{d_i + Dr_i}{d_i} \quad (39)$$

Después de obtener el Resource Tighness físico y el Resource Tighness de información proceden a realizar la estimación del amortiguador como se muestra en la ecuación 40 con base en un Resource Tighness exhaustivo suponiendo que las n actividades i obedecen una distribución lognormal.

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \sqrt{\sum_i^n ((1 + \alpha_i) * \beta_i * \sigma_{iy})^2} \quad (40)$$

7.2.3. Métodos de dimensionamiento difusos: Habitualmente, el progreso en un proyecto es incierto. Esta incertidumbre puede generar varias incógnitas. La primera indaga si los sucesos debieron haber ocurrido de la manera en que lo hicieron, y la segunda asume que la cosa en si (el proyecto) está en un estado de cambio constante donde en un momento inicial está en un punto A y no mucho después en un punto B. A esto se le denomina difusividad⁶¹. Muchos proyectos prácticos se hacen difíciles de replicar debido a las características de los mismos, y solo pueden apoyarse en la experiencia para estimar un resultado final. Así pues, se hace necesario el uso de la "teoría difusa".⁶²

Long y Ohsato⁶³ desarrollan un dimensionamiento de amortiguadores lidiando con los problemas multimodo en programación de proyectos con recursos limitados (MRCPSP) de una manera diferente, desarrollando en un procedimiento denominado (P1) que combina las reglas de decisión y los algoritmos genéticos donde buscan de crear un cronograma determinista que determine el tiempo de cada actividad y solucione el conflicto de recursos, por otro lado utilizan los números difusos para modelar la incertidumbre de cada actividad en una función de membresía.

⁶¹ HERROELEN, Willy, LEUS, Roel y DEMEULEMEESTER, E. Critical Chain Project Scheduling: Do Not Oversimplify. En: Project Management Journal. (2002). Vol.44, No.4, p.48-60.

⁶² LIU, J., DU, J. y REN, H. Project Scheduling Optimization of Critical Chain Management Based on Fuzzy Theory. En: International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, (2013). Vol, 7 No 7; p. 346–353

⁶³Long, 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.

El tiempo que será asignado como duración de cada actividad expresado como (t_j^*) el cual es una de las variables de decisión. Para esto, es necesario que por criterio de expertos se establezca cuáles van a ser los límites en los cuales el parámetro puede variar donde $t^l(j)$ representa el límite inferior y $t^u(j)$ el límite superior.

El resultado del procedimiento P1 es un cronograma determinista deseable. Para hacer frente al problema de la incertidumbre de las actividades, se estima la incertidumbre de cada actividad por medio de una función de membresía trapezoidal.

La función de membresía es expresada de la siguiente manera:

$$\mu(t) \begin{cases} [a, b]; \mu(t) = \frac{b-t}{b-a} \\ [b, c]; \mu(t) = 1 \\ [c, d]; \mu(t) = \frac{d-t}{d-c} \end{cases} \quad (30)$$

Donde t_j^* tiene el mayor valor posible para la estimación de la duración difusa de la actividad, además $t^l(j)$ y $t^u(j)$ que fueron el límite inferior y superior de la estimación en el algoritmo genético, sirven de guía para establecer los valores difusos (b) y (c). Los valores extremos de (a) y (d) se establecen según el criterio del gerente de proyecto.

Una vez modelado el tiempo determinista (t_j^*) como un conjunto difuso con los valores de (a(j), b(j), c(j), d(j)), se utiliza el Índice de acuerdo (AI (A,B)) que expresa la cantidad de por ciento del evento difuso (A) está dentro de los límites

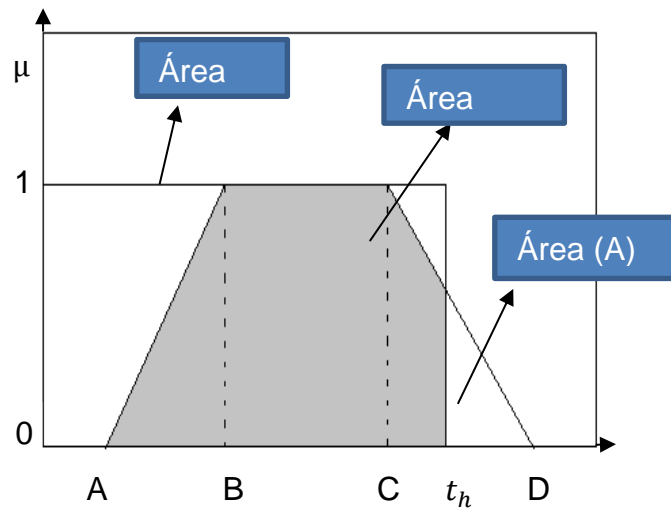
del evento difuso (B). También representa el nivel satisfacción del evento difuso (A) cuando este evento difuso A se compara con el otro evento difuso (B) ⁶⁴.

El índice de acuerdo se expresa de la siguiente manera:

$$AI(A, B) = \frac{AREA(A \cap B)}{AREA(A)} \quad (31)$$

$$0 \leq AI(A, B) \leq 1 \quad (43)$$

Figura 24 índice de acuerdo



Los autores introducen el concepto de duración máxima de acuerdo (t_h) para sustituir un tiempo difuso por un tiempo determinista. Aseguran que una actividad con duración difusa puede terminar a tiempo en un tiempo t_h , si existe un índice de acuerdo alto $AI(A, B) = 0,9$ (recomendado por los autores). Por lo tanto, con

⁶⁴ KAUFMAN, Arnold y GUPTA, Madan. Introduction to fuzzy, theory and application. En: Van Nostrand Reinhold electrical. Computer science and engineering series. (1985). p, 351p.

un el evento A determinado como el numero difuso trapezoidal (a(j), b(j), c(j), d(j)) y el evento B esperado representado como el numero difuso trapezoidal (0,0, t_h , t_h) se puede determinar un tiempo t_h despejándolo de la siguiente ecuación:

$$AI(A,B) = \frac{(c(j) - b(j) - a(j))/2 - (d(j) - t_h) * (d(j) - t_h)/(2 * (d(j) - c(j)))}{(c(j) - b(j) + d(j) - a(j))/2} \quad (44)$$

El tiempo de seguridad S_t se obtiene como la diferencia entre la duración máxima de acuerdo t_h y el tiempo determinista t_j^* .

$$S_t(j) = t_h(j) - t_j^*(j) \quad (45)$$

El amortiguador del proyecto es calculado por RSEM teniendo den cuenta que las variaciones de los números difusos se compensan unas a otras cuando el número de variables aumenta.

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \text{Max}_p \left\{ \sqrt{\sum_{j \in p} S_t(j)^2} \right\} \quad (46)$$

Donde p es el número de cadenas críticas.

Zhang y Chen⁶⁵ , están de acuerdo en que los números difusos son más adecuados que las estimaciones de probabilidad para describir el

⁶⁵ZHANG, M. y CHEN, R. Buffer Sized Technique in Critical Chain Management: A Fuzzy Approach. En: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management .(2008). p 1-4.

comportamiento de las actividades debido a la ausencia de información⁶⁶. Es por esto que plantean un método de estimación de tamaño de los amortiguadores basado en el de Long y Ohsato⁶⁷, sin embargo, ellos consideran que la estimación del tiempo de seguridad debe ser obtenida por medio de la resta de dos t_h correspondientes a un índice de acuerdo alto de 0.9 y 0.5. Por otro lado, ellos consideran que siempre existe la posibilidad de que el proyecto se encuentre en un riesgo externo que no esté asociado directamente a la duración de las actividades, así que incluyen un factor de riesgo el cual su valor se determinará de manera cognitiva por parte del gerente de proyecto.

Zhou⁶⁸ comparte esta idea, sin embargo considera que un el gerente de proyecto debe evaluar si es pertinente tener en cuenta el Resource Tighness o la complejidad de la red, y de ser así utilizar los métodos ADP o APRT utilizando el tiempo de seguridad obtenidos por medio de dos duraciones máximas de acuerdo.

Guo y Dong⁶⁹ piensan que para determinar la duración de las actividades lo más importante es la experiencia del equipo de trabajo encargado de gestión del proyecto, por lo cual utilizan el método Delphi para determinar la duración de las actividades. Para esto cada integrante deberá proponer el tiempo mínimo, el tiempo más probable y el tiempo máximo que durará cada actividad en ejecutarse. Se promedian los resultados y se calcula la desviación entre el valor promedio de todos los participantes y el valor propuesto por cada uno.

⁶⁶ LI, Kun, y CHEN, Yun-xiang. Applying critical chain in project scheduling and estimating buffer size based on fuzzy technique. En: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, (2007). 1068–1072.

⁶⁷ LONG y OSHATO Op. cit

⁶⁸ZHOU, Yikun. A Fuzzy Buffer Setting Method for Project Scheduling under Uncertainty. En: Applied Mechanics and Materials, (2013). Vols 291-294, p. 2889–2894.

⁶⁹ GUO, Yan y DONG, Chao. (2014). Resource conflict resolution method for software projects using fuzzy critical chain. En: Chinese Control and Decision Conference.(2014) p, 2554–2559.

Luego se calcula un conjunto difuso trapezoidal con el mínimo de los valores de desviación del tiempo mínimo, el mínimo y máximo de los valores de la desviación del tiempo medio, y el máximo de los valores de desviación de tiempo máximo, obteniendo así los números difusos a, b, c y d respectivamente.

Teniendo en cuenta los tiempos medios de cada integrante del grupo, se obtiene la duración más probable sin tiempo de seguridad para cada actividad, con lo cual se procede a calcular el t_h y obtener el tiempo de seguridad como resta de los dos valores. Para el cálculo del amortiguador utilizan el método del error de la raíz cuadrada, y tienen en cuenta los factores de Resource Tighness y complejidad de la red.

Por otra parte Shi y Gong ⁷⁰ creen que una manera mejor y más simple de calcular el tamaño de los amortiguadores es considerar características del proyecto como Resource Tighness, complejidad de la red, la preferencia al riesgo y además consideran que la duración de las tareas obedece a una distribución lognormal. Sin embargo, consideran que el Resource Tighness es difícil definir en qué momento existe un nivel adecuado que no influye en la duración del proyecto y en qué momentos si influye, por lo cual, deciden calcularla por medio de números difusos.

El método de dimensionamiento de amortiguadores propuesto se basa como otros autores en RSEM, pero a diferencia de estos que utilizan el tiempo de seguridad de cada actividad para determinar el tamaño del amortiguador, ellos tienen en cuatro factores los cuales son el Resource Tighness medida por medio de una función difusa de tres puntos, la complejidad de la red descrita por Tukul

⁷⁰ SHI, Q., y GONG, T. 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). Vol 1, p. 486–490.

et al⁷¹, un factor de riesgo determinado por el gerente de proyecto y por último la desviación estándar de la función lognormal que describe cada actividad.

Las necesidades de los clientes son de suma importancia, es por eso que Chen et al⁷² continuando con la investigación basada en números difusos, propone un modelo donde además considera a los clientes según el nivel de servicio, un coeficiente tomado de los conceptos de stock de seguridad. En su modelo, el amortiguador es determinado por medio de la relación propuesta entre AI (A,B) y el nivel de servicio.

Por otro lado, Zhen , Wei y Jian ^{73 74} realiza un algoritmo genético para determinar los tamaños de los amortiguadores diferenciándose del procedimiento P1 en que en lugar de utilizar la codificación binaria el algoritmo utiliza una secuencia de cadena de números naturales como el cromosoma de codificación, además los algoritmos de cruce y mutación son personalizados. Aunque también es basado en RSEM, este modelo considera factores descritos por Chen y Hsu⁷⁵ como el grado de credibilidad y la distancia entre el tiempo de inicio más temprano de cada actividad y la duración total del proyecto. Adicionalmente, afirman que no siempre una cadena no crítica necesita que se inserte un amortiguador de alimentación, proponiendo una forma de determinar el punto de inserción, con lo cual, se evitan nuevos conflictos entre recursos.

⁷¹ TUKEL Op. cit p.401-416

⁷² CHEN, L., Liang, F., Shi, X., Deng, Y., & Wang, H. (2010). Fuzzy-Safety-Buffer approach for project buffer sizing considering the requirements from project managers and customers. En: International Conference on Information Management and Engineering, (2010) Vol 1, p. 482–486

⁷³ ZHEN Yu Zhao, WEI, Yang You y JIAN Zuo. Application of Innovative Critical Chain Method for Project Planning and Control under Resource Constraints and Uncertainty. En: Journal of Construction Engineering and Management. (2010). Vol136, No 9, p. 1056–1060.

⁷⁴ZHEN Yu Zhao, WEI, Yang You y QIAN-LEI Lv. Applications of Fuzzy Critical Chain Method in Project Scheduling. En: Fourth International Conference on Natural Computation.(2008) Vol. 6; p. 473-477.

⁷⁵ CHEN, Ming-Kuen y HSU, Shin-Peng. Fuzzy-critical-chain-based project management. En: Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers. (2004). Vol. 21, No 2; p. 167-176.

Ma y Jiang⁷⁶ comparten la idea de Zhang y Chen⁷⁷ que es determinar el tiempo de seguridad de cada actividad por medio de dos diferentes t_h con diferente índice de acuerdo cada uno, no obstante ellos consideran además que existen dos factor trascendentales que puede ayudar a describir posibles retrasos en una cadena, estos son la elasticidad de las actividades y posición de cada actividad en la cadena. Aseguran que mientras más cerca es la duración de la actividad a su valor inferior del conjunto difuso, es menos probable que tenga retrasos.

Por otra parte, afirman que cuando una actividad se encuentra más alejada de su punto de origen es más probable que presenten demoras, por lo cual, asignan un peso a cada actividad mediante una relación del tiempo transcurrido hasta que la actividad inicie y el tiempo total que gastaría la cadena en terminar.

Zhang et al ⁷⁸, sugieren que la incertidumbre de las actividades son la que se deben modelar por medio de los números difusos, por lo cual utiliza el AI (A,B) para determinar el valor de la incertidumbre. Además considera que es necesario realizar un ajuste teniendo en cuenta los atributos o características del proyecto como el Resource Tighness y complejidad de la red propuestos por Tukul et al⁷⁹.

⁷⁶MA, Guo-Feng y JIANG, Yong-Bin. Improved Fuzzy Critical Chain Buffer Setting Method. EN: International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. (2012). Vol 1, p. 240 - 243

⁷⁷ZHANG, M. y Chen, R. Buffer Sized Technique in Critical Chain Management: A Fuzzy Approach. En: IEEE (2008). p 1–4.

⁷⁸ZHANG Junguang, JIA Saike y DÍAZ Estrella. A new buffer sizing approach based on the uncertainty of project activities. En: Concurrent Engineering, (2014). Vol 23, No 1. p, 3–12.

⁷⁹ TUKEL Op. cit p.401-416

El método propuesto para estimar el tamaño de los amortiguadores es el siguiente:

$$\text{Tamaño del amortiguador} = \sqrt{\sum_{i=1}^n ((1 + \alpha_i) * \beta_i * \sigma_i)^2} \quad (47)$$

Donde:

α_i = Resource Tighness de la actividad i , β_i = la complejidad de la red en la actividad i , σ_i = la duración de la incertidumbre de la actividad i obtenida de forma difusa.

7.2.4. Otros métodos: Zhang, Cui, Bie y Zuo⁸⁰, consideran que para lidiar con la incertidumbre de un proyecto hay que tener en cuenta el efecto que producen las fuentes de incertidumbre en las actividades, para esto basados en la investigación de Cho et al ⁸¹ sobre el efecto de características de proyectos que causan incertidumbre, proponen un método de dimensionamiento de amortiguadores basados en una evaluación integral difusa, en el cual evalúan cada factor por medio del método Delphi entre integrantes del equipo de trabajo.

Por otro lado, consideran que la productividad es un factor que afecta directamente la duración del proyecto, y esta productividad se puede ver reflejada en tres aspectos como lo son la disponibilidad de materiales en el tiempo indicado, el poder de ejecución que tienen las personas miembros del proyecto, y el equipo y maquinaria que se tiene para trabajar. Por medio de estas

⁸⁰ ZHANG, Xiaoming et al. Buffer Sizing Method with considering effect of various Uncertainties based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Critical Chain Scheduling. En: Emergency Management and Management Sciences. (2011). p. 566–569.

⁸¹ CHO, K., HONG, T. y HYUN C. Effect of project characteristics on project performance in construction projects based on structural equation model. Expert Systems with Applications. (2009). Vol. 36 No 7; p. 10461-10470.

tres características se puede evaluar la productividad del proyecto sin embargo cada una puede tener una importancia diferente por lo cual es necesario establecer la relevancia de cada una de ellas.

Una perspectiva orientada a los trabajadores es propuesta por Ciupe et al⁸², ellos proponen una forma para solucionar problemas de restricciones de recursos en los proyectos integrando la gestión de amortiguadores. Desarrollan un modelo denominado WIZO (Programador orientado en el conocimiento del empleado) el cual toma como recursos las cualidades y habilidades de los trabajadores del proyecto para asignarlos a las tareas que más se adecuen a ellos. Sin embargo, así el trabajador sea el más indicado para la tarea existe el riesgo de que la tarea se demore, por lo cual realizan una estimación de amortiguadores por cada actividad, teniendo en cuenta cuatro factores: duración de la actividad, nivel de habilidades de requeridas por la actividad, compatibilidad entre esa actividad y las siguientes, influencia de la actividad en el proyecto.

Iranmanesh et al⁸³ afirman que los amortiguadores de alimentación son indispensables para contener las incertidumbres producidas en las cadenas no críticas del proyecto. Sin embargo, consideran que existen actividades que son más importantes debido a que un retraso en ellas puede llevar al retraso de múltiples cadenas no críticas impactando sus respectivos amortiguadores de alimentación y en dado caso de ser consumido totalmente puede generar demoras en la ejecución de las actividades de la cadena crítica.

⁸² CIUPE, Aurelia et al. Resource constrained project scheduling model based on job profile schemes. En: Electronics and Telecommunications. (2013). Vol 54, No4; p. 13–22.

⁸³ IRANMANESH, Hosein, MANSOURIAN, Fatemeh y KOUCHAKI, Samaneh. Critical chain scheduling: a new approach for feeding buffer. En: International Journal of Operations Management. (2016). Vol.25, No 1; p. 114–130.

Proponen un método de estimación de amortiguadores de alimentación con base a un factor denominado *Post Density*, el cual describe las relaciones de precedencia de actividades que generan diferentes caminos dándoles una mayor importancia, además se tiene en cuenta la Resource Tighness y la variabilidad de las actividades.

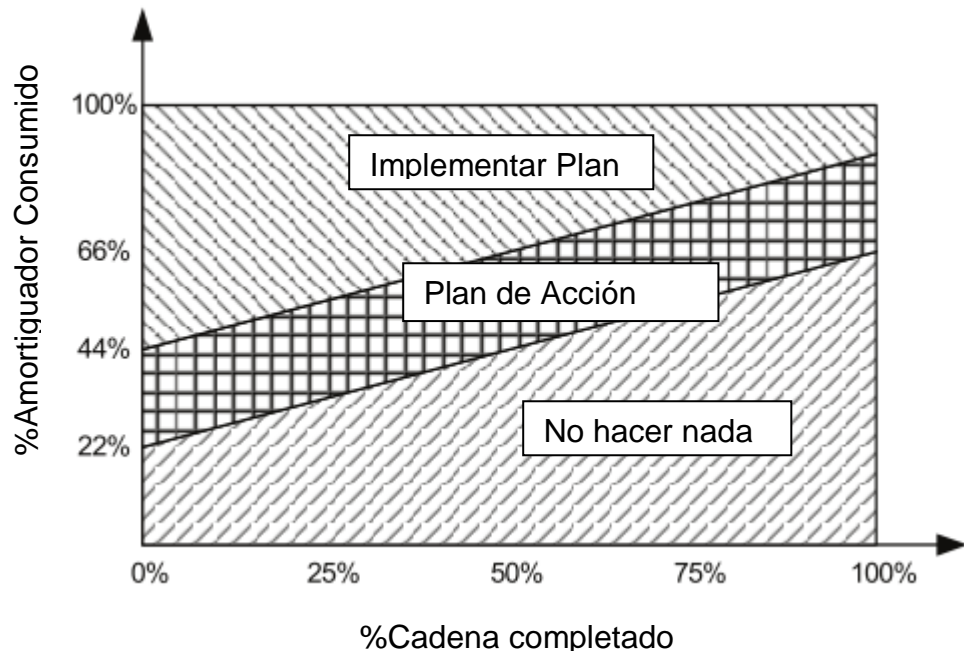
7.2.5. Gestión de los amortiguadores: La gestión de los amortiguadores en proyectos administrados por medio de Cadena Critica centra su atención en mantener la línea base del cronograma como se construyó y tratar de contener el tiempo desperdiciado en demoras o interrupciones por medio de los amortiguadores. Las demoras son reportadas y controladas por medio del nivel de penetración de los amortiguadores⁸⁴.

Geekie y Steyn⁸⁵ consideran que es adecuado controlar los amortiguadores por medio de un cuadro de control relativo, dividido en tres zonas, la zona verde, la amarilla y la roja. Una vez el amortiguador pasa a la zona amarilla se deben empezar los planes de recuperacion de tiempo para volver a la zona verde. Estas zonas son establecidas a decisión del gerente de proyecto. El objetivo es que la zona verde sea estrecha al principio para promover la acción temprana de conservar los amortiguadores del proyecto. No obstante, también aseguran que si existe una tendencia en el consumo del amortiguador en tres puntos sucesivos, se deben realizar acciones para evitar que el proyecto se descontrole. En la Figura se muestra un cuadro de control que recomendar para gestionar y llevar el control de los amortiguadores.

⁸⁴ LECHLER, T. G., RONEN, B., y STOHR, E. a. Critical Chain: A New Project Management Paradigm or Old Wine in New Bottles?. En: Engineering Management Journal, (2005). Vol 17 No 4; p. 45–58.

⁸⁵ GEEKIE, A. y STEYN, H. (2008). Buffer sizing for the critical chain project management method. En: South African Journal of Industrial Engineering (2008) Vol 19, No(1); p. 73-88.

Figura 25 Cuadro de gestión de amortiguadores



Fuente: Adaptado de Geekie y Steyn

Long y Ohsato⁸⁶ consideran que ejecutar revisiones periódicas en actividades de la cadena crítica es de vital importancia, además están de acuerdo con la mentalidad del correccaminos de empezar tan pronto sea posible la próxima actividad una vez se termine su antecesora, monitoreando el progreso de las actividades por el nivel de penetración de los amortiguadores.

Saihjpal y Singh⁸⁷, proponen distribuir el amortiguador del proyecto en las conexiones entre la cadena crítica y no crítica, afirman que al realizar esto la estabilidad del proyecto no se afecta, pero se puede llegar a obtener reducciones en la duración total del proyecto debido a que si la fracción del amortiguador no

⁸⁶ LONG y OSHATO Op. cit

⁸⁷SAIHJPAL, Vibha y SINGH, S. B. New Placement Strategy for Buffers in Critical Chain. En: Advances in Intelligent Systems and Computing. (2012).Vol 236. p. 429-435.

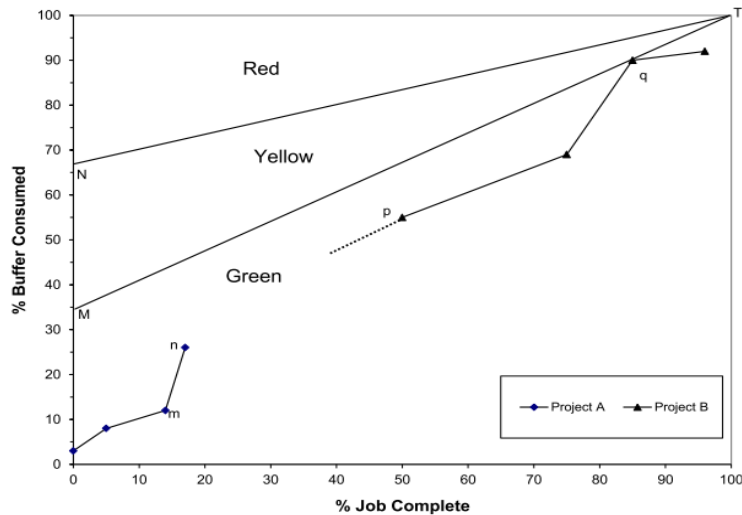
es consumida se puede iniciar con la siguiente actividad de la cadena crítica, siempre y cuando esto sea posible.

Por otra parte Agarwal y Larson⁸⁸, proponen una modificación al cuadro de control de amortiguadores tradicional, afirman que existen ocasiones en las que se pueden generar falsas alarmas en el consumo del amortiguador cuando en realidad no hay que preocuparse. Para esto la pregunta clave es: ¿cuál es el nivel máximo de amortiguador consumido que se puede permitir la empresa sin que el proyecto haya empezado su ejecución? Donde la respuesta tiene que estar en términos de hasta acá no me concierne, me concierne un poco, me concierne mucho. De acá se obtienen los parámetros para determinar la zona verde, amarilla y roja.

Además, los amortiguadores sirven para indicar el punto máximo al cual se deben terminar las actividades por lo tanto el valor de T expresa el consumo del 100% del amortiguador habiendo terminado el 100% de la ejecución del proyecto. En la Figura se puede ver la modificación que se le realizó al cuadro de control de amortiguadores:

⁸⁸ AGARWAL, Atul y LARSON, David. A modified prescriptive model to mitigate behavioral issues in project management. En: Academy of Information and Management Sciences. (2013). Vol. 17, No 2; p. 21- 24

Figura 26 Cuadro de gestión de amortiguadores modificado



Fuente: AGARWAL y LARSON

De esta manera se puede generar una mejor visión sobre el estado en el que se encuentran los amortiguadores en los proyectos.

Para poder determinar si el proyecto se está desarrollando sin problemas proponen una métrica denominada Buffer Burn Index (BBI) que básicamente corresponde a la pendiente de dos puntos del proyecto comparada siempre en un mismo lapso de tiempo como por ejemplo semanalmente.

Idealmente, BBI debe ser menor o igual a 1 que se traduce en que el proyecto se está completando a una tasa mayor a lo que se consume de amortiguador. Cualquier valor mayor que 1 implica lo contrario. Un valor negativo BBI implicaría ganancia en tiempo de búfer en el transcurso de la finalización del trabajo. Un valor infinito BBI sería una señal de que se consume el amortiguador por inactividad en el proyecto.

Por otro lado, Hu, Cui, Demeulemeester y Bie⁸⁹ buscan ayudar a determinar en qué ocasiones se deben tomar de decisiones correctivas. El método propuesto se puede aplicar principalmente en dos escenarios en los cuales se presentan retrasos y por lo tanto se consume tiempo del amortiguador: el primero ocurre cuando existen demoras en dos o más actividades paralelas en un mismo momento con una penetración del amortiguador similar, a cuáles actividades hay que aplicarles un plan de acción o un Crashing para recuperar tiempo del amortiguador, ¿hay que aplicarles a todas? El segundo escenario es cuando realizaste crashing a cierta actividad y llegaste al límite posible de reducción de tiempo de la actividad, sin embargo, no fue suficiente para poner a salvo el proyecto, ¿se debe acelerar también la siguiente actividad de la cadena? ¿Qué tanto debo acortar la duración de actividades sucesivas? ¿cuáles actividades se deben acortar?

Para esto proponen un procedimiento de gestión y control de amortiguadores con base en el en el análisis del riesgo del cronograma en el cual combinan la gestión de los amortiguadores con el CRI (Cruciality index) propuesto por Williams⁹⁰ el cual refleja la importancia relativa de una actividad en el proyecto. El objetivo de combinar estos dos métodos es que con la gestión de amortiguadores la medición del nivel de penetración o consumo del amortiguador sirve para informar al gerente de proyecto cuando debe prestar atención al proyecto y el grado de atención y el indicador CRI determina que actividad es necesaria acelerarla.

⁸⁹ HU, Xuejun, CUI, Nanfang, DEMEULEMEESTER, Erik y BIE, Li. Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk. En: European Journal of Operational Research. (2016). Vol 249. No 2; p. 717-727.

⁹⁰ WILLIAMS, T. Criticality in Stochastic Networks. Journal of the Operations Research Society. (1992) Vol. 43 No 4; p. 353-357.

8. CONCLUSIONES

Según lo encontrado en la literatura, la estimación de los amortiguadores ha sido desarrollada por análisis matemáticos en diferentes aspectos teniendo en cuenta diferentes características, lo cual era una de sus principales carencias debido a que cuando fue establecido el método de cadena crítica fue en gran parte gracias a la experiencia que tenía su creador en la gestión de proyectos y el análisis que sobre el manejo de la incertidumbre.

Los problemas humanos siguen una de las causas principales de la incertidumbre de las actividades, por lo cual se debe tener en cuenta que las actividades tendrán una tendencia a demorarse más de lo establecido.

El método RSEM es la base para la construcción de la mayoría de las estimaciones de amortiguadores debido a su practicidad y su base en la independencia de las actividades para la aplicación del teorema del límite central no obstante este solo no es suficiente y por eso se desarrollan diversos métodos para lograr una protección efectiva de los proyectos con la menor duración posible.

Diversos autores expresaron diferentes puntos de vista sobre las características de los proyectos que deben tenerse en cuenta a la hora de estimar amortiguadores en un proyecto, debido a que al ignorarse se corre el riesgo de extender la duración del proyecto, sin embargo, dos de ellas sobresalen al ser utilizadas por la mayoría de ellos estas son la complejidad de la red y el Resource Tighness.

La experiencia del equipo de trabajo del proyecto y en especial del gerente de proyecto es fundamental en el desarrollo de los proyectos, un factor importante y continuamente nombrado es la preferencia al riesgo asumida por el gerente del proyecto, de esta manera se pueden contener incertidumbres que no están relacionadas directamente con el proyecto, pero pueden afectar su desarrollo

En los casos en los cuales la información histórica es insuficiente la incertidumbre de un proyecto debería ser modelada por medio de un ambiente difuso en el cual el juicio de expertos y la experiencia son factores claves a la hora de determinar la duración de las actividades.

Cada proyecto es único y no todos pueden manejarse de la misma manera, sin embargo, el objetivo de las investigaciones es poder mitigar la mayor cantidad de incertidumbre por medio de la gestión de amortiguadores asegurando una ejecución dentro de la duración del proyecto predeterminada.

La gestión de los amortiguadores está en una situación madura y no se encontró un mucho desarrollo al respecto, sin embargo, algo que se debe aclarar es que cada proyecto asume un riesgo diferente por lo cual es importante que los gerentes de proyecto establezcan desde que punto van a realizar acciones correctivas.

Las simulaciones por Monte-Carlo han mostrado ser una herramienta muy útil para probar la efectividad de los métodos de estimación de amortiguadores y modelar el desarrollo de proyecto.

Diversos autores realizan combinaciones de métodos tradicionales como CPM y PERT con la CC, sin embargo, el factor que más es utilizado es el análisis del riesgo el cual ha sido de gran ayuda para el desarrollo de las investigaciones.

9. RECOMENDACIONES

- Investigar sobre la subjetividad de las decisiones tomadas por los gerentes de proyectos y como poder evitar que se tomen decisiones con base en estos criterios exponiendo factores o características que ayuden a una toma de decisiones más analítica.
- Profundizar sobre las estimaciones difusas en ambientes de poca información histórica, de tal manera de mejorar la eficiencia de los métodos propuestos.
- Comparar entre los diferentes nuevos métodos propuestos entre ellos con el fin de ver cual tiene una mayor efectividad, debido a que en las simulaciones y los casos de estudios usualmente estos métodos eran comparados con los métodos de Cortar y Pegar y RSEM.
- Investigar sobre estimación de amortiguadores para el entorno multi-proyecto el cual tiene poca investigación en relación de las investigaciones realizadas para un solo proyecto.
- Investigar sobre como mitigar los problemas de comportamiento humano directamente en trabajadores del proyecto y no tener que mitigarlo a través de amortiguadores más largos.
- Investigar sobre relaciones entre técnicas de gestión de riesgo relacionadas a la gestión de amortiguadores por cadena critica.

BIBLIOGRAFÍA.

AGARWAL, Atul y LARSON, David. A modified prescriptive model to mitigate behavioral issues in project management. *Academy of Information and Management Sciences*. [en línea] 2013. Vol. 17, No 2; p. 21- 24

ASHTIANI, Behzad et al. A new approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. [en línea] 2007. Vol. 1, No 4; p. 137 – 141.

BALTA Şemsettin. Buffer sizing model with fuzzy assessment on concrete gravity dam and hepp projects. Trabajo de grado. (Maestría en ciencias de Ingeniería Civil). Middle East Technical University. School of natural and applied sciences.

BATTAIL, G. Applying semiotics and information theory to biology: a critical comparison. *Biosemiotics* [en línea]. 2009. Vol. 2(3). P. 303–320

CHEN, L., Liang, F., Shi, X., Deng, Y., & Wang, H. (2010). Fuzzy-Safety-Buffer approach for project buffer sizing considering the requirements from project managers and customers. *IEEE International Conference on Information Management and Engineering*. [en línea] 2010 Vol 1, p. 482–486.

CHEN, Ming-Kuen y HSU, Shin-Peng. Fuzzy-critical-chain-based project management. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. [en línea] 2004. Vol. 21, No 2; p. 167-176.

CHO, K., HONG, T. y HYUN C. Effect of project characteristics on project performance in construction projects based on structural equation model. *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36 No 7; p. 10461-10470.

CIUPE, Aurelia et al. Resource constrained project scheduling model based on job profile schemes. En: Electronics and Telecommunications. (2013). Vol 54, No4; p. 13–22.

FALLAH, Mohammad et al. Critical chain project scheduling : utilizing uncertainty for buffer sizing. En: International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. (2010) Vol 3, No 3; p. 280–289.

GEEKIE, A. y STEYN, H. (2008). Buffer sizing for the critical chain project management method. En: South African Journal of Industrial Engineering (2008) Vol 19, No(1); p. 73-88.

GHAFFARIA Mahdi y EMSLEYB Margaret. Current status and future potential of the research on Critical Chain Project Management. En: Surveys in Operations Research and Management Science. (2015). Vol. 20, No 2; p. 43-54.

GOLDRATT, Eliyahu. Cadena Crítica. Monterrey: Ediciones Castillo, (1997), p. 244.

GOLDRATT, Eliyahu y COX, Jeff. La meta. Madrid: Díaz de Santos. (2005). p. 418.

GUO, Yan y DONG, Chao. (2014). Resource conflict resolution method for software projects using fuzzy critical chain. En: Chinese Control and Decision Conference.(2014) p, 2554–2559.

GUZMÁN, D y CASTAÑO, M. La lógica difusa en ingeniería: Principios, aplicaciones y futuro. En: Ciencia y Tecnología. (2006). Vol. 24, No 2; p. 87-107.

HERROELEN, Willy y LEUS, Roel. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. En: Journal of Operations Management. (2001). Vol. 19 No. 5; p. 559-577.

HERROELEN, Willy, LEUS, Roel y DEMEULEMEESTER, E. Critical Chain Project Scheduling: Do Not Oversimplify. En: Project Management Journal. (2002). Vol.44, No.4, p.48-60.

HOEL, Kjersti y Taylor, Sam. Quantifying buffers for projects schedules. En: Production and Inventory Management Journal. (1999). Vol. 40, No 2; p. 43-47.

HU, Xuejun, CUI, Nanfang, DEMEULEMEESTER, Erik y BIE, Li. Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk. En: European Journal of Operational Research. (2016). Vol 249. No 2; p. 717-727.

IRANMANESH, Hosein, MANSOURIAN, Fatemeh y KOUCHAKI, Samaneh. Critical chain scheduling : a new approach for feeding buffer. En: International Journal of Operations Management. (2016). Vol.25, No 1; p. 114–130.

JIAN-BING, L. et al. Critical Chain Project Management Based Heuristic Algorithm for Multiple Resources-Constrained Project. En: International Seminar on Business and Information Management (2008), Vol 1, p. 330–335.

JING Yu, ZHE Xu y CHEN Hu .Buffer sizing approach in critical chain project management under multiresource constraints. En: International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. (2013). 3, 71–75.

LEACH, Lawrence. Critical Chain Project Management. Boston: Artech House professional development library, 2000. 337p.

LECHLER, T. G., RONEN, B., y STOHR, E. a. Critical Chain: A New Project Management Paradigm or Old Wine in New Bottles?. En: Engineering Management Journal, (2005). Vol 17 No 4; p. 45–58.

LI, Kun, y CHEN, Yun-xiang. Applying critical chain in project scheduling and estimating buffer size based on fuzzy technique. En: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, (2007). 1068–1072.

LIU Deyin, CHEN Jianguo y PENG Wei. New Buffer Setting Method Based on Activity Attributes in Construction Engineering. En: Applied Mechanics and Materials. (2012). Vol 174-177, p. 3274–3281.

LIU, Jingchao y WHANGBO, Taeg-Keun. A Study on the Buffer Sizing Method of CCPM Technique Using Statistical Analysis. En: Convergence and Hybrid Information Technology. (2012). p. 672-679.

LIU, J., DU, J. y REN, H. Project Scheduling Optimization of Critical Chain Management Based on Fuzzy Theory. En: International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, (2013). Vol, 7 No 7; p. 346–353

LONG, Luong Duc y OHSATO, Ario. Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty. En: International Journal of Project Management. (2008). Vol 26. No 6; p. 688–698.

MA, Goufeng, LI, Lei y CHEN, Zhiqin. Research on the buffer sizing approach in critical chain scheduling in perspective of flexible management. En: Advances in Intelligent and Soft Computing. (2012). Vol 143 , p. 61–68.

MA, Goufeng, et al. Improved Critical Chain Project Management Framework for Scheduling Construction Projects. En: Journal of Construction Engineering and Management. (2014). Vo 140, No 12, p. 140.

MARÍN, Diana. Estado de arte de las metodologías para evaluación social en proyectos de inversión. Trabajo de grado (ingeniería industrial). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.

NEWBOLD, Robert, Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints. Boca Raton: St. Lucie Press, (1998). p. 284.

PALACIOS, Nicanor. Teoría de restricciones aplicada al desarrollo de software. Trabajo de grado (Maestría en Dirección de empresas). Universidad Andina Simón Bolívar. Sede Ecuador

RUSSELL, Marion *et al.* Application of Time Buffers to Construction Project Task Durations. En: American Society of Civil Engineers. (2013). Vol, 139 No 10; p. 04013008

SAIHJPAL, Vibha y SINGH, S. B. New Placement Strategy for Buffers in Critical Chain. En: Advances in Intelligent Systems and Computing. (2012).Vol 236. p. 429-435.

SHI, Q., y GONG, T. 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). Vol 1, p. 486–490.

TENERA, Alexandra y MACHADO, V. C. Critical Chain Project Management : A new approach for time buffer sizing. Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference. (2007). Vol 1, p. 475–481.

TEOCÉ CONSULTORS, Bases para la gestión de multiproyectos con CCPM. Critical Chain Project Management. [En línea] <

http://www.teoce.com/rcs_prod/La_aplicaci_n_de_CCPM_a_entornos_de_multiproyectos.pdf f> [citado en 26 de abril de 2016]

TRANFIELD, David, DENYER, David y SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. En: British Journal of Management. (2003). Vol. 14, p. 207-222.

TUKEL, Oya, ROM,Walter y EKSIOGLU, Sandra. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. En: European Journal of Operational Research. (2006) Vol 172, p. 401-416.

WILLIAMS, T. Criticality in Stochastic Networks. Journal of the Operations Research Society. (1992) Vol. 43 No 4; p. 353-357.

XIE, Xue-mei, YANG, Guang y LIN, Chuang. Software development projects IRSE buffer settings and simulation based on critical chain. En: The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications. (2010). Vol 17, p. 100–106.

YANG, Lixi, et al. A buffer sizing approach in critical chain scheduling with attributes dependent. En: International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, (2008). p. 1–4.

YANG,Q. et al. An overlapping-based design structure matrix for measuring interaction strength and clustering analysis in product development project. IEEE Transactions on Engineering Management. (2014). Vol. 61, No 1; p. 159–170.

ZHANG Junguang, JIA Saike y DÍAZ Estrella. A new buffer sizing approach based on the uncertainty of project activities. En: Concurrent Engineering, (2014). Vol 23, No 1. p, 3–12.

ZHANG Ailin, GENG TingTing. Study on the Schedule Management Methods of Projects Based on Critical Chain Technology. Applied Mechanics and Materials, (2014). Vols 488-489, p. 1454–1457.

ZHANG Junguang, SONGA Xiwei y DÍAZ Estrella. Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. En: European Journal of Operational Research. (2016). Vol 248 No 1; p. 174–182.

ZHANG, Junguang et al. Buffer sizing of critical chain based on attribute optimization. En: Concurrent Engineering-Research and Applications. (2014). Vol. 22 No. 3; p. 253-264.

ZHANG, Xiaoming et al. Buffer Sizing Method with considering effect of various Uncertainties based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Critical Chain Scheduling. En: Emergency Management and Management Sciences. (2011). p. 566–569.

ZHANG, M. y Chen, R. Buffer Sized Technique in Critical Chain Management: A Fuzzy Approach. En: IEEE (2008). p 1–4.

ZHEN Yu Zhao, WEI, Yang You y JIAN Zuo. Application of Innovative Critical Chain Method for Project Planning and Control under Resource Constraints and Uncertainty. En: Journal of Construction Engineering and Management. (2010). Vol136, No 9, p. 1056–1060.

ZHOU, Yikun. A Fuzzy Buffer Setting Method for Project Scheduling under Uncertainty. En: Applied Mechanics and Materials, (2013). Vols 291-294, p. 2889–2894.

