

**Análisis de robustez de líneas-base obtenidas para el problema RCPSP con duración
de actividades aleatorias a partir de la técnica de la Cadena Crítica**

Magaly López Pérez y Josué Bernal Reyes

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Industrial

Director

Néstor Raúl Ortiz Pimiento

PhD. En Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad Fisicomécanicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Papá Dios, fuente inagotable de inspiración, le dedico esta tesis de grado como expresión de gratitud por su constante amor y guía en cada paso de mi vida. A mi mami Raquel Pérez, le dedico este logro que es también suyo, agradeciéndole por creer en mis sueños. A mi querida hermanita Majo, agradezco su apoyo incondicional que me motivó a seguir adelante. A mi fiel mascota Luna Lunares, compañera de mis desvelos y traspasadas, le dedico estos momentos de éxito compartidos Y a mi amado compañero de tesis y de vida, Josué, agradezco su apoyo inquebrantable y su amor constante, que han sido mi fuerza y mi inspiración a lo largo de este camino académico. Este logro es el resultado de sus contribuciones y amor incondicional.

Gracias por ser parte fundamental de mi viaje hacia el éxito.

Magaly López Pérez

Primordialmente dedico este triunfo a Dios Todopoderoso, creador de los cielos y la tierra, quien con su gran amor y guía me permitió culminar satisfactoriamente mi paso por la universidad. A mis padres Luz Marina Reyes, Faustino Bernal y mi hermano Fausto, les dedico esta tesis, siempre agradecido con ellos, porque me apoyaron en todo momento, motivándome a ser perseverante en aquellos momentos donde sentí que no podría continuar. A Magaly, mi amada compañera de tesis y vida, le expreso mi sincero agradecimiento. Su amor, ternura, lealtad y fortaleza, me permitió ser constante en este camino tan desafiante. Es con profundo cariño que le dedico este triunfo, simbolizado por la materialización de esta tesis

¡Gracias a todos!

Josue Bernal Reyes

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Profesor Néstor Ortiz Pimiento, nuestro director de tesis, por permitirnos ser parte de su visión de investigación y liderazgo en este proyecto. Su orientación, guía y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de esta investigación. Agradezco su compromiso, paciencia y sabiduría que han dejado una huella invaluable en nuestra formación académica. Estoy profundamente agradecida por la oportunidad de aprender y crecer bajo su dirección.

Magaly López Pérez

Agradezco a Dios por haberme dado carácter, perseverancia e inteligencia para superar cualquier desafío que se me presentó. Quiero también agradecer a mis amigos Wilmer Moreno, Jhonny y Héctor Pérez, por ser personas en quien puedo confiar plenamente, demostrándome siempre su amistad incondicional. Agradezco a aquellos docentes como: Jesús Hurtado, Patricia Rodríguez, Rafael Monroy, Gustavo Ramírez, Leonardo Polo, Roque Carreño, Ferney Calderón, David Puentes (Q.E.P.D) y Néstor Ortiz Pimiento, nuestro director de tesis. Todos ellos me enseñaron a ver el mundo desde diversas perspectivas, alimentando mis ganas de aprender y no perder la creatividad, el cual debe ser un rasgo característico de un Ingeniero. Por todo lo que me enseñaron, estoy muy agradecido por haber estado bajo su mentoría

¡Gracias Totales!

Josue Bernal Reyes

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Generalidades del proyecto	14
1.1. Planteamiento del problema.....	14
1.2. Justificación del proyecto	15
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo General.....	18
2.2. Objetivos Específicos	18
3. Revisión de la Literatura	19
3.1. Análisis Bibliométrico	19
3.1.1. Ecuación de Búsqueda.....	19
3.1.2. Documentos por año.....	20
3.1.3. Autores	21
3.1.4. Territorio.....	21
3.1.5. Keywords.....	22
3.1.6. Citación de autores	25
3.1.7. Co-Citación de autores	26
3.2. Análisis preliminar de la literatura.....	27
4. Marco de Referencias.....	31
4.1. Marco Antecedentes	31
4.2. Marco Teórico.....	34
5. Metodología	46

5.1. Desarrollo de la(s) técnica de CCPM propuesta	46
5.1.1. Identificación de Riesgos	46
5.1.2. Preparación de los datos fuente para el desarrollo	48
5.2. Ejecución de la técnica propuesta	49
5.2.1. Tiempos de actividad.....	49
5.2.2. Alternativas de Buffer	50
5.2.3. Obtención de las líneas-base	52
5.3. Comparación de las líneas-base obtenidas.....	54
5.4. Simulación de Montecarlo.....	57
6. Análisis de Resultados	58
6.1. Indicadores de Robustez y Makespan.....	58
6.2. Resultados entre alternativas propuestas	61
6.2.1. Criterios de evaluación: Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia	61
6.2.2. Criterios de evaluación: Mayor relevancia Makespan sobre los Indicadores de robustez. .	62
6.3. Resultados de comparativa entre CCPM y PLE	64
6.3.1. Criterios de evaluación: Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia	64
6.3.2. Criterios de evaluación: Mayor relevancia Makespan sobre los Indicadores de robustez. .	66
7. Conclusiones	69
8. Recomendaciones.....	71
Referencias Bibliográficas	72

Lista de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos	13
Tabla 2. Resultados de criterios de inclusión y exclusión.	20
Tabla 3. Cuadro de riesgos para las actividades	48
Tabla 4. Makespan Reales	59
Tabla 5. Indicadores de Robustez	60
Tabla 6. Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia	61
Tabla 7. Resultados de Criterios de Evaluación	62
Tabla 8. Makespan mayor relevancia sobre Indicadores de Robustez	63
Tabla 9. Resultados Criterios de Evaluación	64
Tabla 10. CCPM y PLE: Makespan e Indicadores de robustez igual relevancia.....	65
Tabla 11. Resultado comparativo de Criterios de evaluación: CCPM y PLE	66
Tabla 12. CCPM y PLE: Makespan mayor relevancia sobre Indicadores de Robustez	67
Tabla 13. CCPM y PLE: Resultado comparativo de Criterios de evaluación	68

Lista de Figuras

Figura 1. Documentos por año de acuerdo con la ecuación de búsqueda	20
Figura 2. Autores relevantes	21
Figura 3. Países relevantes en la investigación del RCPSP	22
Figura 4. Agrupaciones de palabras claves en la investigación RCPSP	23
Figura 5. Agrupaciones de palabras claves en la investigación RCPSP	25
Figura 6. Autores más influyentes en el campo de RCPSP	26
Figura 7. Red de Co-citación para la investigación de RCPSP	27
Figura 8. Representación grafo ejemplo del RCPSP	37
Figura 9. Diagrama de Gantt ejemplo RCPSP	37
Figura 10. Comparación entre CPM y CCPM	40
Figura 11. Representación de los Buffer en una cadena critica	41
Figura 12. Resultado SGS en paralelo	54

Lista de Apéndices.

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A. Cuadro de Riesgos para actividades

Apéndice B. Proyectos Seleccionados

Apéndice C. Buffer

Apéndice D. Construcción CCPM

Apéndice E. Simulación Montecarlo

Resumen

Título: Análisis de robustez de líneas-base obtenidas para el problema RCPSP con duración de actividades aleatorias a partir de la técnica de la Cadena Crítica.*

Autor: López Pérez Magaly, Bernal Reyes Josue**

Palabras Clave: RCPSP, programación lineal entera, cadena crítica, buffer, gestión de proyectos.

Descripción: En este proyecto de grado se desarrolla el análisis para determinar qué línea-base es más robusta para abordar el Resource-Constrained Project Scheduling (RCPSP), una línea-base obtenida de una solución determinística por medio del modelo Critical Chain Project Management (CCPM), o una línea base obtenida por medio de Programación Lineal Entera (PLE). Para esto se realiza una adaptación al método "cortar & pegar" (C&PM), identificando la ruta crítica e integrando el análisis de riesgos desde una perspectiva probabilística para cada actividad. Además, se establece una regla de prioridad para las actividades, los cuales se obtienen mediante una estrategia reactiva respaldada por un Esquema generador en secuencia (SGS) en paralelo programado en GAMS. Finalmente, se plantean 3 formas de calcular el buffer de proyecto.

Se plantea una comparación con el modelo de (Ortiz Pimiento, 2020), el cual se basa es un modelo de optimización por medio de Programación Lineal Entera (PLE). Esta comparación se realiza con base en 18 proyectos de prueba pertenecientes al conjunto j30 de la librería PSPLIB. A través de una simulación de Montecarlo, utilizando el simulador desarrollado por (Mantilla Romero & Latorre Ramirez, 2022), se generan 10000 posibles escenarios de ejecución para cada proyecto, dando como resultado los indicadores de robustez (calidad y solución).

Los resultados obtenidos evidencian que la integración de un análisis detallado de riesgos desempeña un papel crucial en ambos métodos. La significativa influencia de la probabilidad de ocurrencia de los riesgos en las actividades mejora los resultados obtenidos a través del método Critical Chain Project Management (CCPM). Aun así, como modelo de optimización, la Programación Lineal Entera ofrece una línea base más robusta que las adaptaciones de la cadena crítica (CCPM).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomécanicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Néstor Raúl Ortiz Pimiento. PhD en ingeniería

Abstract

Title: Robustness analysis of baselines obtained for the RCPSP problem with random activity duration using the Critical Chain technique *

Author: López Pérez Magaly, Bernal Reyes Josue **

Key Words: RCPSP, Integer linear programming, critical chain, buffer, project management

Description: This degree project develops the analysis to determine which baseline is more robust to address the Resource-Constrained Project Scheduling (RCPSP), a baseline obtained from a deterministic solution through the Critical Chain Project Management (CCPM) model, or a baseline obtained through Integer Linear Programming (ILP). For this, an adaptation to the "cut & paste" method (C&PM) is performed, identifying the critical path and integrating the risk analysis from a probabilistic perspective for each activity. In addition, a priority rule is established for the activities, which are obtained through a reactive strategy supported by a parallel Schedule Generator Scheme (SGS) programmed in GAMS. Finally, 3 ways of calculating the project buffer are proposed.

A comparison is made with the model of (Ortiz Pimiento, 2020), which is based on an optimization model by means of Integer Linear Programming (ILP). This comparison is made based on 18 test projects belonging to the set j30 of the PSPLIB library. Through a Monte Carlo simulation, using the simulator developed by (Mantilla Romero & Latorre Ramirez, 2022), 10000 possible execution scenarios are generated for each project, resulting in robustness indicators (quality and solution).

The results obtained show that the integration of a detailed risk analysis plays a crucial role in both methods. The significant influence of the probability of occurrence of risks in the activities improves the results obtained through the Critical Chain Project Management (CCPM) method. Still, as an optimization model, Integer Linear Programming offers a more robust baseline than the critical chain adaptations (CCPM).

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanics. School of Industrial and Business Studies. Director: Néstor Raúl Ortiz Pimiento. PhD in Engineering

Introducción

La gestión de proyectos se caracteriza fundamentalmente por la administración eficiente de los recursos necesarios para la planificación y ejecución de proyectos. Esto permite visualizar las posibilidades en diversos escenarios y, al mismo tiempo, influir directamente en las operaciones futuras, disminuyendo la probabilidad de fracaso, pérdidas de dinero, tiempo, entre otros factores cruciales en la economía actual (Reyes, 2015). Dado esto, se ha abordado la investigación del problema de programación de proyectos con recursos restringidos (Resource Constrained Project Scheduling Problem- RCPSP), que consiste en determinar un cronograma o línea-base de las actividades del proyecto, teniendo en cuenta las relaciones de precedencia y recursos, con el objetivo de minimizar el makespan, optimizar la utilización de los recursos disponibles, entre otros objetivos. Se pueden adoptar dos perspectivas para abordar este problema: una determinista, en la que todos los valores de los parámetros son constantes, y otra no determinista, que toma en cuenta la variabilidad real de uno o más parámetros del problema, como la duración de las actividades o el consumo de recursos.

La perspectiva no determinística ha crecido al incorporar comportamientos aleatorios en las variables de entrada, utilizando métodos heurísticos y metaheurísticos. Un ejemplo claro de este enfoque es el método de la cadena crítica (CCPM), introducido por Goldratt en 1997. Este es un método heurístico que se caracteriza por utilizar buffers de tiempo o recursos estratégicamente ubicados en la cadena crítica del proyecto para eliminar el tiempo de seguridad en cada actividad mediante técnicas como la regla de cortar y pegar (C&PM). Sin embargo, dimensionar adecuadamente los buffers es un desafío, ya que una subestimación o sobreestimación puede llevar

a replanificaciones, costos excesivos ó la no finalización del proyecto. Aunque los métodos heurísticos ofrecen soluciones robustas en tiempos razonables y con un esfuerzo computacional moderado, la elección del método dependerá del contexto del proyecto, y en algunos casos, los métodos determinísticos pueden proporcionar mejores resultados.

Por tanto, esta investigación se ha enfrentado al desafío de proporcionar una solución determinística para el modelo CCPM, con el fin de lograr una nueva forma de abordar el problema RCPSP considerando el análisis de riesgos en las actividades desde una perspectiva probabilística. Se ha realizado una comparación entre las líneas-base obtenidas a través de la adaptación propia del método de cortar & pegar y la línea-base resultante de la tesis doctoral “*Modelo de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria*” (Ortiz Pimiento, 2020). Esta comparación se ha llevado a cabo mediante la simulación de escenarios de ejecución del proyecto generados mediante el método Montecarlo, seguido de un análisis de los indicadores de robustez.

En cuanto a la metodología establecida, se divide en cinco fases. La Fase I aborda la revisión de la literatura en la cual seleccionamos la base de datos, realizamos la ecuación de búsqueda y llevamos a cabo un análisis bibliométrico. La Fase II se centra en la adaptación de la técnica CCPM, presentando tres adaptaciones de la técnica cortar & pegar del método CCPM. La Fase III trata sobre la obtención de las líneas-base, de las propuestas dadas y la línea base resultante de PLE. La Fase IV aborda la comparación de resultados con instancias de la literatura, mediante una simulación de Montecarlo e indicadores de robustez llevando a cabo su análisis. Finalmente, la Fase V se enfoca en la elaboración del documento final y respectivo artículo de carácter publicable con los resultados obtenidos de esta investigación.

Tabla 1. *Cumplimiento de objetivos*

Objetivo	Cumplimiento
Identificar los principales aportes de la literatura científica en torno a las aplicaciones de la técnica de CCPM en el problema RCPSP.	Capítulo 1
Desarrollar una propuesta que permita aplicar la técnica CCPM para el problema RCPSP con duración de actividades aleatorias.	Capítulo 5
Comparar la robustez de la(s) línea-base generada por la cadena crítica (CCPM) propuesta con la robustez de una línea-base obtenida a partir de programación lineal entera.	Capítulo 5 y 6
Elaborar un artículo de carácter publicable a partir de los resultados obtenidos en la investigación.	Artículo

1. Generalidades del proyecto

1.1. Planteamiento del problema

El problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP) consiste en determinar un cronograma o línea-base de las actividades del proyecto, teniendo en cuenta las relaciones de precedencia y recursos, con el objetivo de minimizar el makespan, optimizar la utilización de los recursos disponibles, entre otros objetivos. Así mismo, una forma de solucionar este tipo de problema es por medio de la metodología de Cadena Crítica (CCPM), que se basa en identificar la cadena más larga de tareas con recursos dependientes (cadena crítica), la cual es la principal restricción que limita el rendimiento del proyecto. Esta metodología se caracteriza por eliminar el tiempo de seguridad incorporado en cada actividad individual, además del posicionamiento y tamaño del buffer utilizado (Zarghami et al., 2020), los cuales tienen como objetivo garantizar la finalización oportuna de los proyectos; por tal motivo, empresas de tecnología, financiera, gestión de proyectos lo utilizan por su facilidad en la coordinación y comunicación.

Aunque es crucial dimensionar adecuadamente los buffers en CCPM, existe una contradicción inherente: si el buffer es demasiado grande, genera un plazo de finalización más seguro, pero también aumenta el costo del proyecto y reduce la competitividad del proyecto, lo que puede llevar a su pérdida; por otro lado, si el buffer es demasiado pequeño, se puede presentar replanificaciones y procedimientos de emergencia costosos para evitar retrasos en el proyecto (Altarazi & Bao, 2015; Hall, 2016). Aunque en la literatura se mencionan técnicas de dimensionamiento de buffers, como: SSQ, C&PM, FBSM, ninguna de ellas soluciona

completamente este problema, lo que ha motivado la investigación de nuevas técnicas de solución, las cuales incluyen incertidumbres y tiempos aleatorios en un proyecto, con el objetivo de obtener una solución robusta.

A pesar de que los métodos heurísticos pueden ofrecer una solución robusta en un tiempo razonable y con un esfuerzo computacional moderado, la elección del método más adecuado dependerá del contexto específico del proyecto. En ciertos casos, puede ser conveniente emplear métodos determinísticos para obtener mejores resultados: por la tanto, en esta investigación, se buscará una solución determinística para un método como lo es el CCPM y se comparará con la línea-base obtenida en (Ortiz Pimiento, 2020), a partir de dos indicadores de robustez, con el objetivo de dar respuesta a la pregunta de investigación ¿Cuál línea-base es más robusta para resolver el RCPSP en el contexto de las actividades: una línea-base obtenida a partir de un método determinística como lo es Programación Lineal Entera (PLE) o una solución obtenida por el método de la CCPM ?.

1.2. Justificación del proyecto

Una de las ventajas competitivas más destacadas en las organizaciones hoy en día es la gestión eficiente y optima de proyectos. Con frecuencia, las actividades dentro de un proyecto están interrelacionadas, al igual que las restricciones de recursos y la priorización entre pares de actividades que siguen un orden determinado (Hartmann & Briskorn, 2022). En este contexto, adquiere relevancia el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (Resource Constrained Project Scheduling Problem -RCPSP-), cuyo objetivo primordial es organizar las actividades del proyecto de manera que se minimice la duración total o makespan, considerando la disponibilidad de recursos, la duración de las actividades y su prioridad (Ortiz Pimiento, 2020).

Mayormente el RCPSP son problemas de alta complejidad computacional, por lo que se requiere aplicar técnicas metaheurísticas, heurísticas o exactas para obtener una solución robusta.

Entre las técnicas determinísticas, destaca la Programación Lineal Entera (Integer Linear Programming -PLE-), gracias a su flexibilidad para combinar variables y modelar con precisión las complejas restricciones y objetivos del RCPSP, puede ofrecer una solución robusta del problema. Sin embargo, la naturaleza determinista de la PLE, al considerar parámetros fijos como costos y tiempos, puede limitarse a un máximo de 60 actividades en la que las instancias no tienen una gran restricción de recursos. No obstante, puede no ser siempre adecuada para proyectos con demasiadas actividades y soluciones que deban determinarse rápidamente (Pellerin et al., 2020). En respuesta a estas limitaciones, se han explorado enfoques no determinísticos como la Cadena Crítica (Critical Chain Project Management -CCPM-), el cual se caracteriza por emplear buffers o amortiguadores estratégicos a lo largo de la cadena del proyecto para minimizar el impacto potencial de cambios o incertidumbres durante la ejecución del proyecto. Por otra parte, determinar el tamaño y la ubicación adecuados de estos buffers sigue siendo ambiguo debido a las ventajas e inconvenientes de los procedimientos de dimensionamiento, dependiendo de la naturaleza del proyecto (Fuentes et al., 2019).

Por consiguiente, la elección de la metodología para abordar el RCPSP se vuelve crucial para evitar sobredimensionamiento en las fechas de entrega. Aunque los métodos heurísticos han ganado aceptación en las últimas décadas por proporcionar aproximaciones a una solución óptima con un esfuerzo computacional razonable (Morillo et al., 2014b), esto no excluye la implementación de métodos determinísticos. Por lo tanto, a lo largo de esta investigación se forzarán una solución determinística para un modelo como es el CCPM, el cual comparará la línea-base y los indicadores de robustez implementados en la tesis doctoral Modelo de solución al problema de

programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria (Ortiz Pimiento, 2020), determinando cuál método es el más robusto, logrando así una nueva forma de abordar el RCPSP teniendo en cuenta el contexto de las actividades.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Realizar un análisis de robustez de la línea-base obtenida al resolver el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) a través de la técnica de gestión de proyectos por cadena crítica (CCPM).

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar los principales aportes de la literatura científica en torno a las aplicaciones de la técnica de CCPM en el problema RCPSP.
- Desarrollar una propuesta que permita aplicar la técnica CCPM para el problema RCPSP con duración de actividades aleatorias.
- Comparar la robustez de la(s) línea-base generada por la cadena crítica (CCPM) propuesta con la robustez de una línea-base obtenida a partir de programación lineal entera.
- Elaborar un artículo de carácter publicable a partir de los resultados obtenidos en la investigación.

3. Revisión de la Literatura

3.1. Análisis Bibliométrico

El siguiente análisis bibliométrico se inicia con la búsqueda de artículos científicos relacionados al problema RCPSP con duración aleatoria y la técnica de la Cadena Crítica.

3.1.1. Ecuación de Búsqueda

Para realizar una correcta ecuación de búsqueda se utilizan las bases de datos proporcionadas por la Universidad Industrial de Santander, institución que posee la licencia de *Scopus*; la cual permite realizar búsquedas multidisciplinarias y observaciones de comportamiento en diversas publicaciones de carácter científico.

Se realiza una búsqueda primaria, ingresando la ecuación de búsqueda correspondiente al tema principal de la investigación del siguiente modo: *ALL (“rcpsp” OR “Resource Constrained Project Scheduling Problem”)*, obteniendo 7.174 artículos. Teniendo en cuenta lo ambiguo de la búsqueda y el volumen de los resultados, se incluyen otros factores igualmente relevantes en la investigación tales como: el método Critical Chain o sus siglas CCPM, el espacio de almacenamiento o Buffer y la duración aleatoria, dando como resultado la siguiente ecuación:

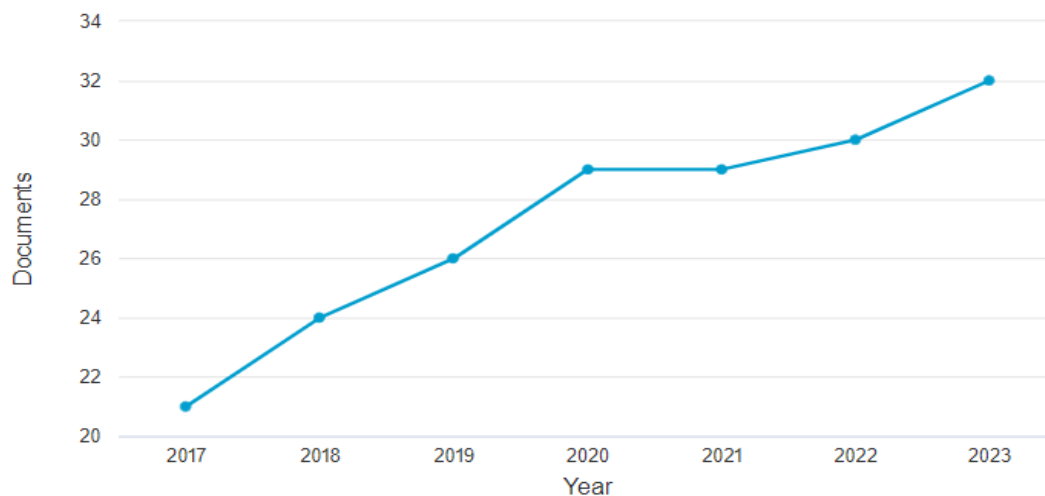
ALL (((“rcpsp” OR “Resource Constrained Project Scheduling Problem”) AND (“ccpm” OR “Critical Chain” OR “buffer”) AND (duration AND random OR uncertain OR uncertainty)))*, esta ecuación está limitada por un rango de tiempo de los últimos seis años (entre 2017 y 2023); obteniendo un total de 191 artículos, los cuales se analizarán a través de las herramientas de Scopus, el software libre VOSviewer y Bibliometrix.

Tabla 2. Resultados de criterios de inclusión y exclusión.

Criterio	Resultados
Todos los archivos	7.174
Inclusión de términos	289
Últimos 5 años	191
Categoría de Journal	179

3.1.2. Documentos por año

La Figura 1 muestra una tendencia creciente en la investigación relacionada con RCPSP y CCPM desde el 2017, mostrando así el interés por parte de la comunidad científica en este campo de investigación. El 2023 ha sido el año en el que más documentos se publicaron con un total de 32 artículos, confirmando así la relevancia que está tomando este tema actualmente.

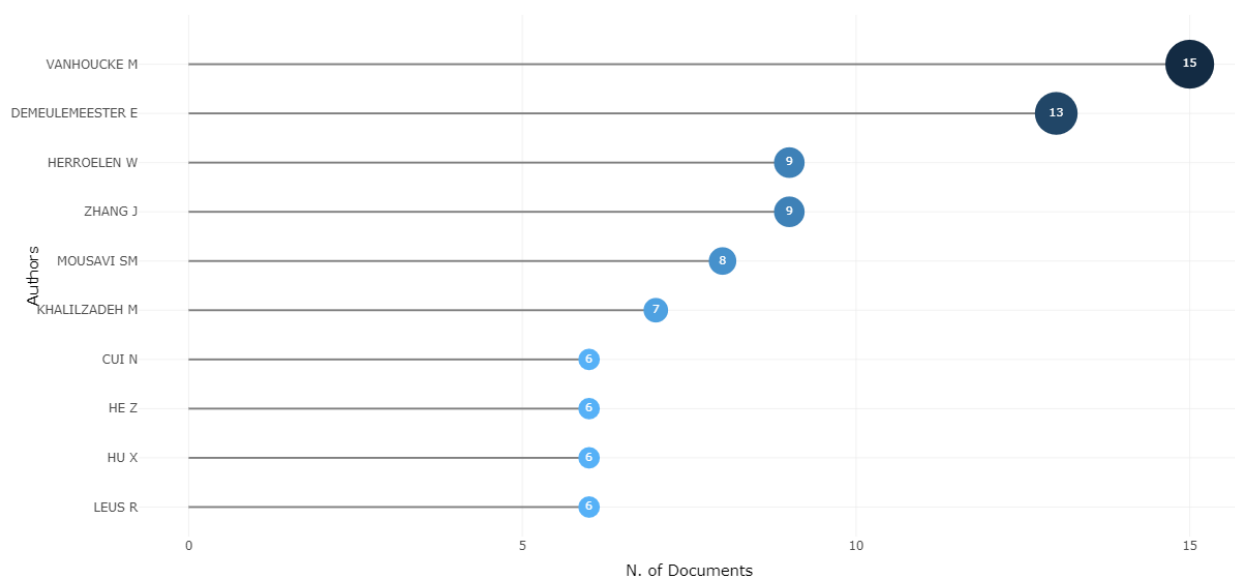
Figura 1. Documentos por año de acuerdo con la ecuación de búsqueda

Nota. Gráfico representa la tendencia de los documentos en el tiempo. Adaptado de Scopus (2023)

3.1.3. Autores

En la Figura 2, se observa los 10 autores más destacados en la investigación del problema RCPSP y CCPM, siendo el más relevante Vanhoucke, M. con un total de 15 documentos (5.19%), seguido por Demeulemeester E, con un total de 13 documentos (4.49%) Herroelen W. con un total de 9 documentos (3.11%), siendo estos los tres autores referentes en este campo. Así mismo, se evidencia que los rangos en que oscilan mayormente las publicaciones son entre 6 y 9 documentos por autor.

Figura 2. Autores relevantes



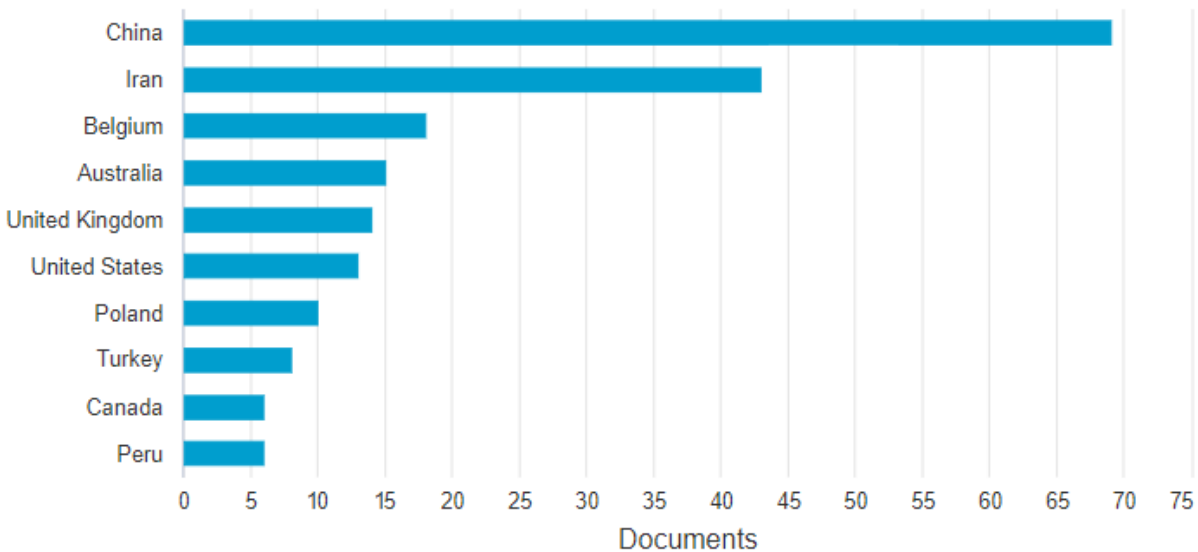
Nota. Gráfico adaptado de Bibliometrix (2023)

3.1.4. Territorio

Como se muestra en la Figura 3, China tiene una fuerte influencia en el campo de la investigación del problema RCPSP publicando 69 documentos (36,12%), seguida de Irán con 43 documentos (22,51%) y Bélgica con 18 documentos (9,42%), todos siendo publicados entre 2017 y 2023. Cabe resaltar el aporte que realiza Colombia con 2 documentos (1,04%) ubicándose entre

los 25 primeros países en este tipo de investigación, indicando así el potencial que se tiene a nivel nacional para explorar soluciones a los problemas RCPSP.

Figura 3. Países relevantes en la investigación del RCPSP



Nota. Gráfico adaptado de Scopus (2023)

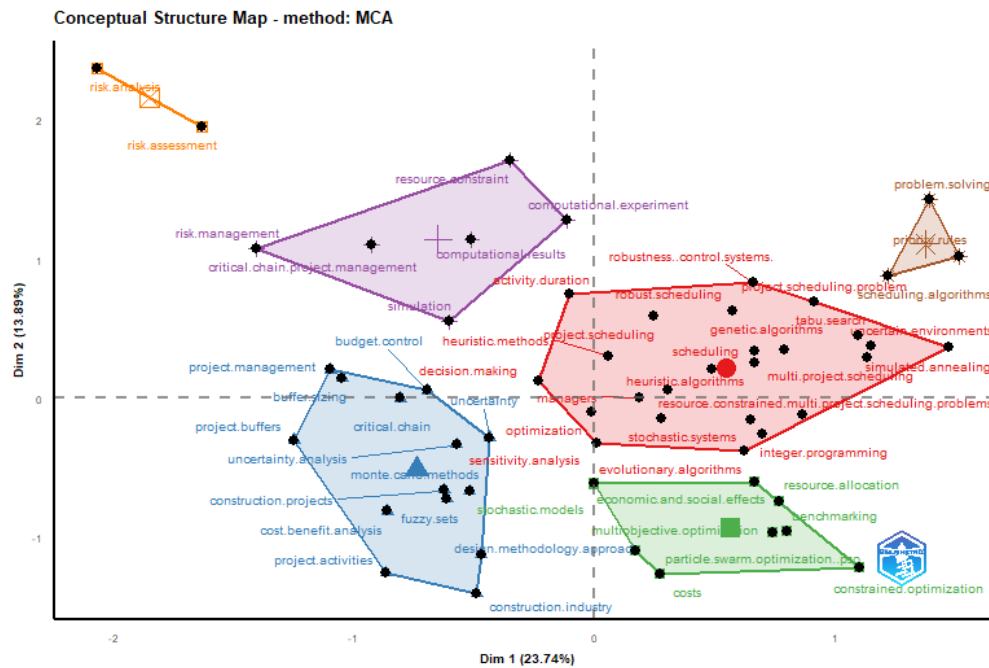
3.1.5. Keywords

La Figura 4, corresponde al mapa de agrupación de palabras claves generado en VOSviewer, el cual se logra a través del coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de Jacar, permitiendo la relación entre las palabras y similitud entre conjuntos respectivamente; dando como resultado 71 palabras divididas en cinco conjuntos diferentes, de las cuales resaltan: Scheduling (Planificación) con 85 menciones, Project Scheduling (programación de proyectos) con 57 menciones, Project Management (gestión de proyectos) con 38 menciones, Stochastic Systems (sistemas estocásticos) con 28 menciones y Heuristic Algorithms (algoritmos heurísticos) con 18 menciones.

uncertainty (incertidumbre), entre otras, este clúster se enfoca principalmente en la creación de los conjuntos y búfer.

- **Clúster verde.** Conformado en su interior con: multi objective optimization (optimización multiobjetivo), Economics and social effects (Efectos económicos y sociales); benchmarking (evaluación comparativa), cost (costo), constrained optimization (optimización con restricciones), particle swarm optimization (optimización de Enjambre de partículas). Se centra en las restricciones y optimización de los buffers.
- **Clúster café.** A pesar de su tamaño tiene componentes que consideramos importantes en el análisis como lo son problem solving (resolución de problemas), priority rule (regla de prioridad), scheduling algorithms (algoritmos de programación).
- **Clúster morado.** Ubicado a la misma distancia de los 2 clústeres anteriores y conformado por menos componentes que el principal, está integrado por temas como Risk management (Gestión de riesgos); critical chain project management (gestión de proyectos de cadena crítica), computational results (resultados computacionales), simulation (simulación) y computational experiments (experimentos computacionales). Se enfoca en la simulación y los resultados.
- **Clúster amarillo.** Este es clúster de menor tamaño conformado por solo dos temas, Risk analysis (Análisis de riesgos), Risk assessment (Evaluación de riesgos), es un clúster enfocado en la evaluación y análisis de los riesgos.

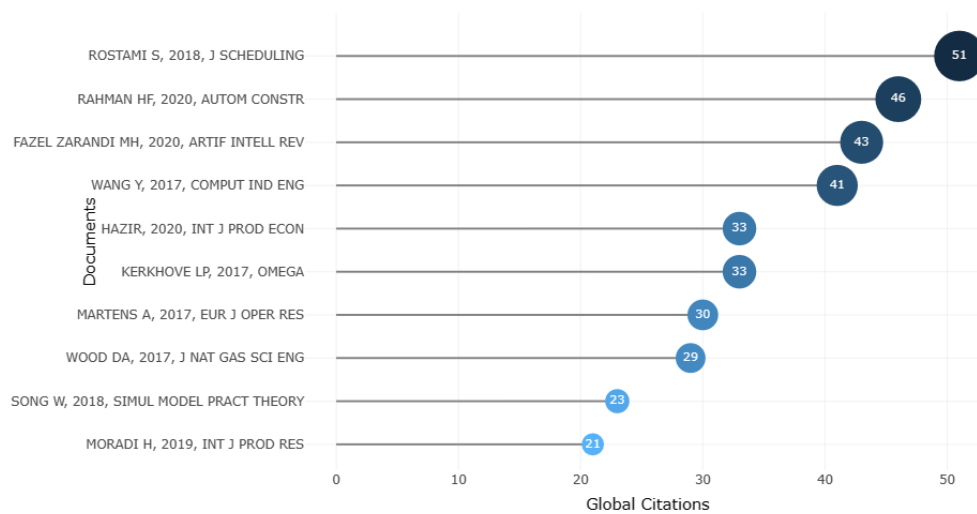
Figura 5. Agrupaciones de palabras claves en la investigación RCPSP



Nota: Grafico adaptado del software Bibliometrix (2023)

3.1.6. Citación de autores

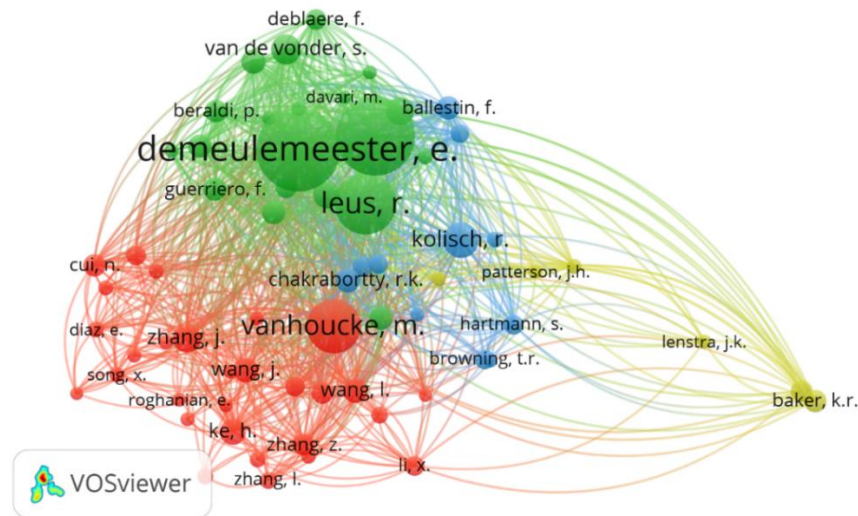
En la figura 6, se muestra el mayor número de citaciones de autores, siendo Rostami el autor más citado por su publicación *New strategies for stochastic resource-constrained project Scheduling*, con un total de 51 citaciones entre 2017 y 2023, seguido por el autor Humyun FuadRahman con su publicación *Memetic algorithm for solving resource constrained project scheduling problems* con un total de 46 citaciones y Mohammad Hossein Fazel Zarandi con su publicación *A state of the art review of intelligent Scheduling* con un total de 43 citaciones.

Figura 6. *Autores más influyentes en el campo de RCPSP*

Nota: Grafico adaptado del software Bibliometrix (2023)

3.1.7. *Co-Citación de autores*

Con el objetivo de evaluar la frecuencia de ocurrencia, se realiza el análisis de co-citación de autores, permitiendo identificar la mayor afinidad entre autores relevantes en la investigación. La Figura 7 es el mapa de las agrupaciones de afinidad, el cual está segmentado en cuatro clústeres, los cuales destacan que autores han sido más co-citados en el grupo, siendo Demuelemeester, vanhoucke, kolisch y Baker los más relevantes; cabe resaltar que las líneas también demuestran que incluso autores de un clúster son citados en compañía de otros pertenecientes a otros grupos

Figura 7. Red de Co-citación para la investigación de RCPSP

Nota. Gráfico adaptado del software VOSviewer (2023)

3.2. Análisis preliminar de la literatura

De acuerdo con (Herroelen, Willy et al., 1998), el problema de programación de proyectos con recursos limitados (Resource Constrained Project Scheduling Problem -RCPSP) comenzó a tener relevancia a partir de 1950 gracias a su aporte en la planeación de proyectos en diferentes áreas operativas, administrando recursos y optimizando tiempos. Al ser un tema de investigación bastante estudiado, se recomienda la lectura de los siguientes artículos: (Herroelen, W. & Leus, 2004), (Ortiz-Pimiento & Diaz-Serna, 2018) y (Hazır & Ulusoy, 2020); los cuales hacen una revisión literaria extensa en temas de programación robusta (proactiva), incertidumbre en la duración de actividades y clasificación de las principales fuentes de incertidumbre.

(Greenslade & Salmon, 2017), hace una retrospectiva sobre el origen de la cadena crítica (Critical Chain Project Management- CCPM), mencionando los aportes hechos por Goldratt (1997), además de una revisión literaria respecto al tamaño de los amortiguadores o buffers y

posterior dimensionamiento, llegando a la conclusión de que es erróneo suponer una relación lineal dependiente entre el consumo de búfer del proyecto y el porcentaje de finalización de la cadena crítica. En el mismo año, (Zhang et al., 2017), realiza una investigación para el desarrollo de un método de tamaño de búfer basado en un problema de programación de proyectos con recursos limitados para obtener una proporcionalidad adecuada entre la duración de la actividad y el tamaño del búfer; el cual se basa en considerar las limitaciones de recursos promedios generales como el tipo de restricciones de recursos, para luego a través de un modelo cuantitativo difuso calcular el requerimiento de recursos obteniendo así una mayor eficiencia, protección efectiva y un tamaño de amortiguación adecuada.

(Roghalian et al., 2018), propuso una mejora al CCPM con un enfoque difuso para programar proyectos bajo incertidumbre adoptando un modelo RCPSP; con el fin de minimizar el riesgo en la programación, utilizo la raíz cuadrada del método de suma de cuadrados (SSQ) ya que permite modificar el coeficiente y así dimensionar el búfer de proyecto al final de la programación para utilizarlo de ser necesario. Por otra parte (Pang et al., 2018), estudio tres factores influyentes que conducen al retraso en el tiempo de inicio de actividad, desarrollando un algoritmo heurístico de buffer disperso de holgura de actividad unitaria, que difiere de algoritmos basados en la literatura previa ya que no depende de la distribución de probabilidad que se da antes de la duración, si no que analiza los factores claves que influyen en la estabilidad del cronograma con lo cual establece el índice de media de la robustez para hallar directamente la ubicación y el tamaño de la inserción del búfer.

Posteriormente (W. Wang et al., 2019) propuso un submodelo proactivo de programación de múltiples proyectos, el cual se basaba en la generación de horarios alternativos utilizando un algoritmo de recocido simulado. Este algoritmo tiene como objetivo minimizar el costo y la

duración del proyecto en entornos inciertos a través de un amortiguador científicamente racional permitiendo recuperar positivamente la interferencia en el sistema de programación. En el mismo año (Pellerin & Perrier, 2019), realizaron una revisión sobre metodologías y técnicas desarrolladas hasta la fecha para los problemas de toma de decisiones más comunes; de las cuales resaltaba aun el RCPSP para la planificación de proyectos en la actualidad; de la misma forma, se nota un creciente interés por herramientas de programación robusta y la inclusión de técnicas de inteligencia artificial (IA), además de un mayor enfoque a la naturaleza estocástica de los proyectos debido a la inclusión de la incertidumbre en su estudio.

(Zarghami et al., 2020), propuso un método el cual trata la disponibilidad de recursos como una variable aleatoria en la programación de proyectos, cada recurso tiene una distribución de posibles valores de disponibilidad, determinando el tamaño del búfer y así asignando un factor de escala a la desviación estándar de la cadena, el cual fue la función de la confiabilidad de los recursos disponibles asignados a las actividades, el análisis de efectividad así como la comparación con métodos convencionales de tamaño de buffer revelaron la efectividad de este nuevo método. (Shariatmadari & Nahavandi, 2020), desarrolló un algoritmo que mejora la robustez de los cronogramas a través de la inserción de amortiguadores de recursos durante el horizonte de planificación en el cual la disponibilidad de los recursos varía con el tiempo y la incertidumbre se encuentra en el uso de los recursos renovables necesario para el cumplimiento de las actividades, propuso un algoritmo iterativo para la mejora de la robustez basado en el uso de la mejor medida sustituta y se estima la inversión requerida demostrando que la pendiente de la tasa de mejora de la robustez hacia la inversión de robustez siempre está descendiendo.

Por otra parte (Kulejewski et al., 2021) presentaron un modelo para programar la construcción de instalaciones de energía renovable a partir del método de cadena crítica con un

nuevo enfoque, el cual consiste en dimensionar los búferes de tiempo con el uso de técnicas de optimización determinista y optimización estocástica, teniendo en cuenta las necesidades pertinentes en la gestión de la construcción, basando los criterios de optimización en el análisis del flujo de caja del proyecto de construcción. (Aramesh et al., 2021) en un proceso de tres pasos incorporó una medida de proyección híbrida, tomando las duraciones de las actividades en intervalos y los recursos en números reales, esto a través de una matriz de decisión ponderada por los expertos y seleccionó como algoritmo de solución el recocido simulado (SA); luego, para los amortiguadores obtuvo un método de toma de decisiones grupales considerando este mismo para la asignación de los búfer del proyecto; en las actividades toma como base un factor normalizado el cual se introdujo teniendo en cuenta la duración y requisitos de las actividades y recursos, dando como resultado un nuevo procedimiento de control que extendió mediante el seguimiento del búfer de actividad.

Recientemente (Zohrehvandi, Shakib & Shahzileh, 2022), realizaron una innovación al poder calcular simultáneamente el tamaño del búfer del proyecto, de alimentación y los de recursos por medio de un algoritmo heurístico, para determinar el tamaño adecuado se estableció el límite de recursos promedios y el nivel más alto de límites de recursos, logrando así minimizar los retrasos en los que podría incurrir la cadena crítica. Además, en ese mismo año (Zohrehvandi, S., 2022), nuevamente realizó innovaciones en otro estudio de investigación, estimando la duración exacta de las actividades el proyecto mediante la integración de los métodos Delphi y PERT; de igual manera, determinó el tamaño del amortiguador, calculando los buffers y aplicando el algoritmo para implementar un algoritmo de ciclo combinado (ACC) utilizado en proyectos de centrales eléctricas de ciclo combinado como ejemplo numérico.

4. Marco de Referencias

4.1. Marco Antecedentes

En los últimos años se ha presentado un interés fuerte en los temas de programación de proyectos en el semillero de investigación ÓPALO adscrita a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la Universidad Industrial de Santander. Entre las tesis de pregrado presentadas en esta universidad se encuentra la de (Tautiva Quinche & Fuentes Luna, 2021) titulada *“Desarrollo de un algoritmo genético para resolver el Problema de Programación de Proyectos con Recursos Restringidos (RCPSP) con duración de actividades aleatorias soportados en un método en duraciones redundantes”*, la cual consiste en obtener el mejor makespan y su línea-base asociada, añadiendo tiempo extra a la duración original, dando como resultado una comparación de indicadores de robustez con la programación reactiva realizada con el método exacto utilizando los mismos parámetros. Asimismo, (Madrid Guiza & Calderon Barreto, 2021), en su tesis de pregrado titulada *“Desarrollo de un algoritmo genético para resolver el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) con duración de actividades aleatorias soportado en un proceso de simulación de Monte Carlo”*, hacen una comparación de indicadores de robustez de la solución y calidad con un método exacto por medio de la simulación Montecarlo.

Por otra parte (Ortiz Pimiento, 2020), presento en la Universidad Nacional de Colombia la tesis doctoral *“Modelo de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria”*. Esta investigación está dividida en cuatro etapas. La primera etapa es la identificación de los riesgos, en esta etapa los riesgos externos conocidos comúnmente como los eventos que interfieren con el

desarrollo normal de las actividades fueron asumidos como independientes y se consideró constante la probabilidad de ocurrencia de este riesgo a lo largo del horizonte de la planeación del proyecto; por su parte, el margen de error al momento de hacer los cálculos se puede considerar como un riesgo interno y se calcula con la desviación estándar de la duración aleatoria de la actividad en ausencia de riesgo externo; en la segunda etapa, se calcula la duración de las actividades a partir de cuatro procedimientos alternativos, los cuales se mencionan a continuación:

- El primer procedimiento es un análisis pesimista, el cual toma el valor máximo obtenido mediante un proceso de simulación realizada con la información de los riesgos.
- El segundo procedimiento son valores esperados a criterio del gerente, el cual define si el riesgo externo afecta o no a las actividades.
- Un tercer procedimiento es el de calcular la exposición de la actividad al riesgo externo multiplicando su probabilidad de ocurrencia y el impacto esperado, dando como resultado que el impacto total de los riesgos es la sumatoria de los impactos individuales sobre la actividad.
- Finalmente, un cuarto procedimiento es considerar poco probable la ocurrencia a totalidad de los riesgos identificados; dado esto, toma como único parámetro a calcular el riesgo que genera mayor impacto en la actividad.

La tercera etapa, utiliza un modelo de programación lineal entera programado en GAMS usando el Solver MIP de CPLEX, el cual utiliza un algoritmo de ramificación y corte. Por último, debido a que cada línea-base generada es diferente para cada uno de los procesos es necesaria la cuarta etapa “comparación y selección de la mejor línea-base”, la cual consiste en realizar la comparación de cada línea-base teniendo en cuenta dos conceptos de robustez (solución y calidad),

ya que, se abarca un análisis de la capacidad para soportar interrupciones que afectan los tiempos de inicio de cada actividad y la fecha de finalización del proyecto. Como aportes fundamentales de este proyecto se destaca la integración de un análisis detallado de riesgos del proyecto con un modelo de optimización que genera una línea-base robusta y la adaptación del RCPSP con duración aleatoria de actividades e inserción de tareas al caso de proyecto de desarrollo de nuevos productos.

(She, 2020) presentó la tesis doctoral “*Critical Chain Identification and Buffer Sizing for Efficient Project Management*” en la universidad de Warwick; en la cual propone un procedimiento para el dimensionamiento de los buffers basado en la descomposición analítica de la red. Primeramente, el buffer de alimentación se determina a partir de todas las cadenas no críticas, posteriormente al búfer de proyecto se le agregan márgenes de seguridad fuera de la cadena crítica comparando las cadenas de alimentación con sus contrarias paralelas; dando como resultado, una cadena crítica muy precisa en la duración del proyecto y búfer de alimentación más pequeños, garantizando así reducciones en el proceso y reproceso. Cabe resaltar que entre las contribuciones de esta tesis están: a) Introducir tres métodos de Critical Chain Identification (CCI) y la heurística para obtener cadenas críticas alternativas más eficientes a las derivadas el método estándar RCPSP teniendo en cuenta los recursos de tiempo y costos. b) Ser los primeros en abordar el dimensionamiento de los buffers mediante la descomposición analítica de las redes de proyectos.

4.2. Marco Teórico

Para una correcta gestión de proyectos, se hace relevante una buena planificación y por consiguiente la programación de las actividades y recursos. Como menciona (Wu et al., 1993), **la programación de proyectos (Project Scheduling Problem- PSP-)** se centra en la generación de un cronograma de actividades, también conocido como **Línea-base**, el cual sirve de referencia para la ejecución del proyecto, cumpliendo funciones importantes, tales como: asignación eficiente de recursos (renovables, no renovables y doblemente restringidos), planificar actividades externas (compra de materiales, mantenimiento de máquinas y cumplimiento de entregas). Entre los métodos más relevantes en este tipo de programación, se encuentra **el método determinístico**, el cual se caracteriza porque los parámetros de entrada son valores fijos, tales como: cantidad de recursos, costos y duración de las actividades; sin embargo, en un entorno propenso a incertidumbre o comportamientos aleatorios es necesario el uso de probabilidades dando como resultado un **problema de optimización de tipo no determinístico** (Ortiz Pimiento, 2020). A medida que se suman variables ya sean fijas o aleatorias, el esfuerzo computacional necesario para estudiar todas las probabilidades existentes aumenta, dando lugar a que se pueda catalogar como un **problema de clase P, NP o NP hard**, dependiendo de su propia complejidad se resuelven por medio de algoritmos heurísticos, metaheurísticos o exactos.

De esta manera, los **métodos exactos** se manejan bajo premisas específicas tales como: continuidad, máximo de 60 actividades por proyecto, entre otras; llegando así a una solución óptima siempre y cuando exista (Alipouri et al., 2019). Por lo tanto, este método se utiliza ampliamente en proyectos que no involucran grandes combinaciones de dependencias, siendo los más relevantes: Exhaustive Search, Mixed Integer Programming, Divide and Conquer, Dynamic Programming, Integer Linear Programming y Branch and Bound (Morillo et al., 2014b), en

cambio, **los métodos heurísticos o metaheurísticos** tienen una mejor respuesta ante situaciones complejas de grandes combinaciones de dependencias. De acuerdo con (Alipouri et al., 2019), los **métodos heurísticos** suelen dar soluciones factibles con poco esfuerzo computacional, por lo que pueden ser sensibles ante los cambios en los parámetros del problema. Entre los métodos más destacados están el del **método de la Cadena Crítica** que se caracteriza principalmente por el uso de buffer de tiempo para absorber cualquier eventualidad que puede ocurrir en el desarrollo del proyecto; así mismo, se encuentra el **método Basado en Reglas de Prioridad**, el cual se caracteriza por utilizar procedimientos iterativos compuestos por dos elementos: un esquema generador de secuencias y una regla de prioridad, destacando que, durante una sola iteración, cada actividad se programa solo una vez.

En el esquema generador de secuencias (Schedule Generator Scheme- SGS) se pueden identificar dos esquemas distintos: **método en serie** y un **método en paralelo**, los cuales generan un cronograma viable al expandir progresivamente un cronograma parcial (es decir, un cronograma en el que solo se ha asignado una hora de finalización a un subconjunto de actividades durante cada etapa) (Kolisch, 1996).

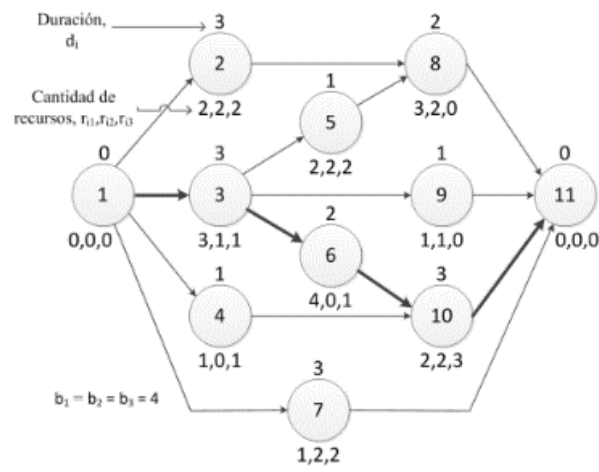
- **El método en serie** emplea un conjunto de fases equivalente al número total de tareas presentes en el proyecto. En cada fase, se elige una tarea con base a una regla de prioridad y se planifica su ejecución lo antes posible, siempre y cuando se respeten las restricciones de precedencia y recursos. El proceso finaliza cuando todas las tareas han sido programadas y se espera que el conjunto de soluciones generadas por este procedimiento siempre incluirá la solución óptima (Morillo et al., 2014a).
- **El método paralelo** está compuesto por un tiempo de decisión o nivel, el cual consta de programar la mayor cantidad de actividades posibles en cada instante respetando las

restricciones de recursos y precedencia, y está asociado con el tiempo de la finalización de una actividad en progreso. Si bien, este esquema en paralelo puede producir secuencias más compactas, no se tendrá la certeza de que estas contengan la solución óptima en todos los escenarios, dado que las actividades programadas en cada nivel están incluidas en un subconjunto del conjunto potencia y el óptimo no se incluye en ese subconjunto. (Morillo et al., 2014a).

Por su parte, los **métodos metaheurísticos**, permiten realizar una búsqueda más amplia al utilizar parámetros de exploración (búsqueda global) y explotación (búsqueda local), entre otros mecanismos permitiendo eludir los óptimos locales y logrando así obtener una solución factible; destacándose los siguientes algoritmos: Recocido simulado, Búsqueda Tabú, Algoritmos genéticos y Algoritmos basados en poblaciones (Morillo et al., 2014a).

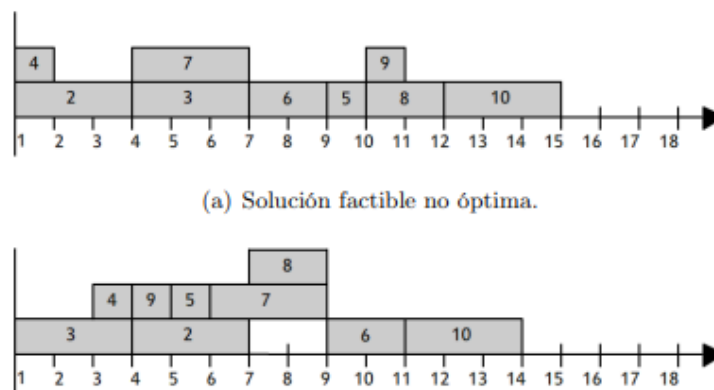
A partir del PSP, surge el tan conocido **problema de programación de proyectos con recursos restringidos (Resource Constrained Project Scheduling Problem- RCPSP)**, el cual tiene en cuenta la disponibilidad de recursos, duración de actividades y sus precedencias; además de minimizar la duración prevista del proyecto, al ser un problema con un alto grado de esfuerzo computacional, logra ser categorizado como un problema NP-hard. Así mismo, se puede desarrollar bajo un enfoque determinístico (minimizar el *makespan*) o un enfoque no determinístico (incorporar comportamientos aleatorios en los parámetros de entrada del modelo) (Ortiz Pimiento, 2020). A continuación, se muestra cómo se puede representar el RCPSP en una representación grafo y en un diagrama de Gantt respectivamente.

Figura 8. Representación grafo ejemplo del RCPSP



Nota. Adaptado de *Representación grafo ejemplo de un RCPSP con 11 tareas y 3 recursos.* (Morillo et al., 2014b) de *Metodologías Analíticas y Heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 1.*

Figura 9. Diagrama de Gantt ejemplo RCPSP



Nota. Adaptado de *Diagrama de Gantt ejemplo de RCPSP con 11 tareas y 3 recursos.* (Morillo et al., 2014b) de *Metodologías Analíticas y Heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 1*

El RCPSP determinístico se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma de acuerdo con (Demeulemeester & Herroelen, 2011):

$$\text{Min } f_n \quad (4.1)$$

Sujeto a:

$$f_1 = 0, \quad (4.2)$$

$$f_i \leq f_j - d_j \quad \text{para todo } (i, j) \in A, \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in S_t} r_{ik}^p \leq a_k^p \quad \forall k \in K^p \quad y \quad t = 1, \dots, f_n \quad (4.4)$$

Donde, f_i indica el tiempo de finalización de la actividad i ; d_i denotan la duración determinística de la actividad; a_k^p indica la disponibilidad del k -ésimo tipo de recurso renovable y r_{ik}^p denota el requisito de recurso de la actividad i para el tipo de recurso k . Así mismo, el conjunto S_t , utilizado en la ecuación (4.4), denota el conjunto de actividades que están en curso en el periodo t . Las ecuaciones indican lo siguiente:

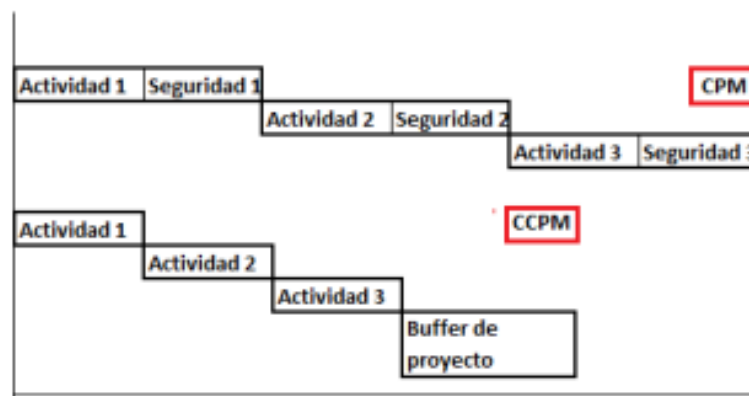
- La función objetivo de (4.1) se refiere a minimizar el tiempo de finalización de la actividad final ficticia.
- La ecuación (4.2) establece que la actividad de inicio ficticio finalice en el tiempo cero.
- La ecuación (4.3) indica las restricciones de precedencia de finalización-inicio y retraso cero.
- La ecuación (4.4) establece que en ningún punto del alcance del proyecto puede verse afectada la disponibilidad de recursos.

Para un RCPSP no determinístico, se utilizan estrategias para poder resolverlos, tales como: predictiva, reactivas o proactivas; de acuerdo con (Brčić et al., 2012), las **estrategias predictivas** no tienen en cuenta el riesgo de afectar la duración de la actividad, además de tomar como referente parámetros determinísticos como el valor esperado de la duración de las actividades, resolviéndose como un problema determinístico. Así mismo (Ortiz Pimiento, 2020), menciona que las **estrategias reactivas** permiten secuenciar actividades en el momento en que se ejecuta el proyecto, dando a entender que no es necesario la creación de una línea-base para su realización; por último, las **estrategias proactivas** incorporan el riesgo dentro del modelo matemático con el fin de generar una línea-base robusta (tiempos de inicio necesitan pocos ajustes) para el proyecto.

Una forma de solucionar un RCPSP es a través del **método de la Cadena Crítica (Critical Chain Project Management – CCPM-)**, también conocida como gestión de amortiguadores o buffers, introducido por Eliyahu Goldratt alrededor de 1997 como una aplicación directa de la Teoría de Restricciones (TOC) (Roghianian et al., 2018), la cual se enfoca en identificar y controlar las restricciones del sistema para mejorar el rendimiento general del mismo. A diferencia del camino crítico (CPM), el cual tiene también considera las relaciones entre recursos; la cadena crítica se define como la secuencia de actividades dependientes tanto de precedencia como de recursos que determinan el tiempo de finalización de proyecto (Ulusoy & Hazır, 2021). El objetivo de CCPM no solo permite gestionar el riesgo de duración del proyecto y reducir el makespan, sino que también elimina la seguridad oculta en la duración de las actividades. Esto ayuda a prevenir el inicio tardío de las actividades, conocido como el síndrome del estudiante, así como a evitar la ocupación fingida por parte del personal (ley de Parkinson) y a prevenir la finalización tardía de las actividades debido a la ley de Murphy o a la multitarea. (Roghianian et al., 2018).

De acuerdo con (Yongyi Shou & K. T. Yao, 2000), CPM trata la incertidumbre de la misma manera para todas las actividades del proyecto, agregando un tiempo de seguridad al final de cada actividad, independientemente si son o no caminos críticos, dando como resultado un sobredimensionamiento; mientras que en el enfoque de Cadena Crítica, los tiempos de seguridad se ajustan y reubican en posiciones estratégicas para proteger la cadena crítica general (ver Figura 11), logrando así reducir la longitud del camino crítico y, por lo tanto, la duración total del proyecto.

Figura 10. Comparación entre CPM y CCPM



Nota. Adaptado de *Comparativa del enfoque de la seguridad en CPM y en CCPM* (Fuentes et al., 2019) de Estudio del efecto de la estimación del tiempo y el tamaño del búfer de proyecto en el Método de la Cadena Crítica.

Por su parte, los amortiguadores o buffer sirven como mecanismo de protección ante cualquier eventualidad en la operación y desarrollo de un proyecto, además de ser actividades separadas. Existen tres tipos de buffer que pueden incluirse en un proyecto, los cuales son:

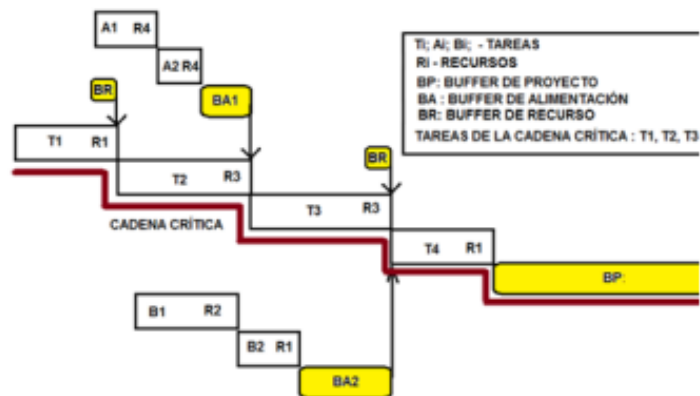
- **Buffer de alimentación (FB)** se agrega cuando una cadena no crítica se conecta a una cadena crítica, además de ser el encargado de proteger la cadena crítica de

desviaciones a lo largo de las cadenas de alimentación (Jo et al., 2018; Zohrehvandi, Shakib et al., 2022).

- **Buffer de recursos (RB)** se encarga de proteger el retraso en el inicio de las actividades debido a las limitaciones de recursos (Jo et al., 2018). Además de servir como una llamada de atención para garantizar que los recursos estén disponibles cuando se necesiten y que las tareas críticas de la cadena comiencen de inmediato (Ansari et al., 2022).
- **Buffer de proyecto (PB)** normalmente se determina antes de asignar el búfer de alimentación (Ansari et al., 2022); así mismo, protege la fecha objetivo del deslizamiento a lo largo de la cadena crítica (Jo et al., 2018).

A continuación, se muestra cómo se ubican los buffers de alimentación, proyecto y recursos en una cadena crítica (ver Figura 12).

Figura 11. Representación de los Buffer en una cadena crítica.



Nota. Adaptado de *Aplicación de los búfer en CCPM*. (Fuentes et al., 2019) de Estudio del efecto de la estimación del tiempo y el tamaño del búfer de proyecto en el Método de la Cadena Crítica.

El paso principal al momento de iniciar con el planteamiento del CCPM es determinar el tamaño del búfer o buffers, ya que debe ser lo suficientemente grande para poder soportar el trabajo de las actividades precedentes, porque de lo contrario el proyecto podría sufrir inactividad. Como expresa (Altarazi & Bao, 2015), el definir correctamente el tamaño del búfer puede ser una paradoja, ya que cuanto más es su duración, más seguro y confiable será el plazo de finalización del proyecto, pero, al incrementar el plazo de finalización del proyecto se genera una pérdida de competitividad y un mayor costo. Para poder calcular adecuadamente el tamaño de los amortiguadores se pueden recurrir a ciertos métodos, tales como:

- **Regla de cortar y pegar (Cut & Paste Method- C&PM)**, consiste en calcular el tamaño del búfer como el 50% de la duración de la cadena más extensa que alimenta el amortiguador. Donde W_i es la estimación con mayor protección de las actividades, con una probabilidad de cumplimiento del 90% y TB es el tamaño del búfer (Fuentes et al., 2019). Ya determinada la cadena crítica, se suma y utiliza la mitad de esta suma como búfer de alimentación, siendo agregado al final de la cadena de alimentación, donde se une con la cadena crítica, dando como resultado un búfer suficientemente grande para soportar cualquier eventualidad (Roghanian et al., 2018)

$$TB = 0.5 * \left[\sum (0.5 * W_i) \right] \quad (4.5)$$

Otra forma en la que se puede plantear este método es utilizando dos estimaciones de tiempo, siendo W_i para la duración proyectora y D_i para la estimación razonable, además de considerar el 50% de la suma de las diferencias de las dos duraciones, suponiendo que el 50% de las veces las actividades se realizarán en ese tiempo (Jan & Ho, 2006).

$$TB = 0.5 \left[\sum (W_i - D_i) \right] \quad (4.6)$$

- **Raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SSQ):** tiene en cuenta la variación conocida de la tarea en la duración de la tarea, aunque esto puede resultar en tamaños de búfer insuficientes para cadenas largas (Roghanian et al., 2018). En este método el tamaño del búfer se calcula por medio de la suma de los cuadrados de las diferencias entre la duración de bajo riesgo S_i y la duración media para cada tarea a lo largo de la cadena más extensa A_i (Newbold, 1998); siendo PB el amortiguador de proyecto; n es el número de actividades de la cadena crítica (Roghanian et al., 2018)

$$PB = 2 * \sqrt{\left(\frac{S_i - A_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_i - A_i}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_n - A_n}{2}\right)^2} = \left[\sum_i^n (S_i - A_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

- **Tamaño del búfer en función de la evaluación de la clase de riesgo:** indica el tamaño que puede tener tanto el búfer de proyecto como el búfer de alimentación a partir de la dispersión relativa (RD), la cual es calculada con la desviación estándar σ de cada actividad y D_i es su duración media, como resultado, cuanto mayor sea la dispersión relativa, más probable es que la operación dure mucho más que la duración promedio calculada, lo que implica una mayor incertidumbre (Yongyi Shou & K. T. Yao, 2000)

$$RD = \frac{\sigma}{D_i} \quad (4.8)$$

- **Método de tamaño de búfer difuso (FBSM):** aborda las limitaciones de recursos y la incertidumbre en la gestión de proyectos, considerando coeficientes para integrar tres incertidumbres del aprovisionamiento de recursos, la complejidad de la red y las

opciones de riesgo del gerente del proyecto (Q. Shi & T. Gong, 2009). Los coeficientes se definen de la siguiente forma (Roghanian et al., 2018):

$$a_i = \max \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{r_{kt}}{R_t} \right\} t \in [st_i, st_i + D_i] \quad (4.9)$$

Donde R_t es un recurso con una cantidad límite superior en el periodo de tiempo t ; r_{kt} es la cantidad total de recursos de la actividad k necesaria en el tiempo t ; m es el número de actividades en el proyecto; st_i es la hora de inicio de la actividad i ; D_i es la duración de la actividad i .

Para lograr ser objetivos al momento de elegir la mejor línea-base para un proyecto, se recurre a los indicadores de robustez, los cuales son utilizados para el análisis de líneas-base a partir de un proceso de simulación. De acuerdo con (Kim et al., 2021) “*El término "robustez" se refiere al desempeño de un cronograma para resistir las perturbaciones tanto como sea posible durante la implementación del proyecto*”; lo cual se traduce como la efectividad de la línea-base del proyecto. Existen diversos tipos de robustez del proyecto; sin embargo, los más comunes son: robustez de calidad (quality robustness) y la robustez de la solución (solution robustness).

La robustez de la solución (SR) se puede definir como la capacidad de la línea-base para resistir las perturbaciones que afectan los tiempos de inicio de cada actividad (Demeulemeester & Herroelen, 2011). De acuerdo con (Ortiz Pimiento, 2020), esta robustez se puede calcular de la siguiente manera:

- Inicialmente se calcula la desviación media para cada una de las actividades del proyecto ΔS_i utilizando la ecuación (4.10)

$$\Delta S_i = \frac{\sum_1^m |S_{LBi} - S_{Ri}|}{m} \quad (4.10)$$

Donde S_{LBi} corresponde la hora de inicio planificada en la línea-base del proyecto para cada actividad i ($i= 1, 2, \dots, n$), y S_{Ri} representa el tiempo de inicio real ejecutado para la actividad i (obteniendo mediante un proceso de simulación con m escenarios).

- Una vez obtenido el valor de ΔS_i , se emplea dicho resultado para determinar el indicador de robustez de solución (**SR**) por medio de la ecuación (4.11)

$$SR = \sum_1^n \Delta S_i \quad (4.11)$$

La robustez de calidad (QR) se puede definir como la capacidad de resistir las perturbaciones que afectan la fecha total de finalización del proyecto; en otras palabras, es maximizar la probabilidad de que el tiempo de finalización del proyecto no exceda el valor de la fecha de vencimiento recomendado previamente (Demeulemeester & Herroelen, 2011). Así mismo, de acuerdo con (Ortiz Pimiento, 2020), esta robustez se puede calcular de la siguiente manera:

$$QR = \frac{\sum_1^m |S_{LBi} - S_{Ri}|}{m} \quad (4.12)$$

Donde QR hace referencia a la desviación promedio para la última actividad del proyecto ΔS_n , por lo que la ecuación (4.12) refleja que $QR = \Delta S_n$.

Al momento de realizar el análisis de los indicadores de robustez se recurre a una **simulación Montecarlo**, la cual utiliza la teoría de la probabilidad y la estadística para generar números aleatorios a partir de una distribución de probabilidad particular, permitiendo considerar

tanto la robustez de la duración total, como también por actividad (Kim et al., 2021); permitiendo ejecutarlo tanto para problemas determinísticos como no determinísticos.

5. Metodología

5.1. Desarrollo de la(s) técnica de CCPM propuesta

5.1.1. *Identificación de Riesgos*

Como señala (Elmaghraby, 2005), los riesgos se pueden clasificar en dos categorías: Los **riesgos externos** incluyen eventos que pueden interrumpir el curso normal de las actividades del proyecto, como accidentes laborales, condiciones climáticas, entre otros. Los **riesgos internos** se refieren al grado de error que surge al estimar la duración de una actividad sin tener en cuenta los riesgos externos. Cabe resaltar que el impacto de un riesgo puede ser tanto positivo como negativo tal cual menciona el Project Management Institute (PMI) (PMI, 2013), conllevando a un aumento o disminución en la duración de la actividad. En esta fase del proyecto, los riesgos externos identificados están asociados a cada una de las actividades, considerando tanto su impacto como su probabilidad de ocurrencia, además de modelarse a través de una distribución normal de probabilidad. Se asume que estos riesgos externos son eventos independientes, y su probabilidad de ocurrencia es constante a lo largo de la actividad de planificación del proyecto.

Se opta por tener cuatro riesgos (dos positivos y dos negativos) para cada una de las actividades de cada proyecto seleccionado. Con el fin de organizar la información sobre los riesgos y su impacto en las actividades, se construye un cuadro de riesgos para las actividades; se sugiere consultar el Apéndice A. Cuadro de riesgos para actividades para obtener una visión detallada. A

continuación, se da un ejemplo simplificado de cómo está organizado los riesgos por actividades en la tabla 3, utilizando la siguiente nomenclatura:

b_i : Duración estimada de la actividad i . Dicha duración sigue una distribución normal $N(\mu, \sigma)$.

Ru_j : Media esperada del riesgo. Se refiere a la duración real de una “tarea adicional” generada por la ocurrencia de un riesgo j . La cual sigue una distribución normal $N(\mu, \sigma)$.

Rd_j : Desviación estándar del riesgo en caso de existir.

RA_i : Ruleta de decisión. Para determinar la ocurrencia o no de un riesgo en una actividad cualquiera, se procede a calcular un valor aleatorio entre 0 y 1

RP_{ji} : Probabilidad de ocurrencia del riesgo externo j que afecta la actividad i .

h_{rj} : Duración de los riesgos externos siguiendo una distribución normal $N(Ru_j, Rd_j)$

$$h_{rj} = \pm \left[Ru_j + Rd_j \sum_{k=1}^n \frac{(2k)! (-1)^{k-1}}{2k-1!} \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{2k-1} \right] \quad (5.1)$$

$$h_{rj} = \begin{cases} \pm h_{rj}, & RP_{ji} \leq RA_i \\ 0, & RP_{ji} > RA_i \end{cases} \quad (5.2)$$

La función objetivo de este modelo busca encontrar el valor del riesgo externo que aplica para cada actividad del proyecto. La ecuación (5.1) proporciona una forma extensa de calcular el valor inverso de una distribución normal estándar con un nivel de significancia de $\alpha = 0.5$. El valor que toma **Ru_j** se genera de forma pseudoaleatoria entre 0 y 0.40 de la duración esperada de la actividad en cuestión **b_i** . De manera similar, el valor que toma **Rd_j** , se genera de forma pseudoaleatoria entre 0 y 0.10 de **Ru_j** .

Por otra parte, la ecuación (5.2) establece la condición que indica la presencia de un riesgo externo en la actividad. Si el valor de RP_{ji} el cual es un valor que se genera de forma pseudoaleatoria entre 0 y 0.3 es mayor a RA_i no existe un riesgo externo. En cambio, si la situación es la opuesta, se considera que efectivamente existe un riesgo externo a la actividad, el cual se puede manifestar de manera positiva o negativa. La duración de este riesgo h_{rj} sigue una distribución normal $N(\mu, \sigma)$.

Tabla 3. Cuadro de riesgos para las actividades

Actividad	Duración de Actividad (b_i)	Riesgos	Probabilidad de ocurrencia del riesgo (RP_{ji})	Duración del riesgo h_{rj}
A	N (8, 0.80)	- Riesgo 1	0.05	N (0.16, 0.02)
		Riesgo 4	0.09	N (1.19, 0.12)
		- Riesgo 1	0.08	N (0.18, 0.02)
		- Riesgo 2	0.21	N (1.82, 0.18)
B	N (4, 0.40)	Riesgo 3	0.21	N (1.05, 0.10)
		Riesgo 4	0.04	N (2.84, 0.28)
		- Riesgo 1	0.14	N (2.92, 0.29)
C	N (6, 0.60)	- Riesgo 2	0.27	N (2.34, 0.23)

Nota. Elaboración propia matriz de riesgos

5.1.2. Preparación de los datos fuente para el desarrollo

En el marco de esta investigación, se decidió emplear la librería PSPLIB para abordar el problema de RCPSP, seleccionando aleatoriamente un conjunto de 18 proyectos de prueba pertenecientes al conjunto j30. Cada uno de estos proyectos consta de 32 actividades, cada una con una duración esperada y un consumo de recursos específicos. Asimismo, dos de estas actividades

son ficticias, marcadas como inicio y fin, las cuales poseen una duración y consumo de recursos nulos; se sugiere consultar el Apéndice B. Proyectos seleccionados.

Dada la naturaleza de esta investigación, que emplea la técnica de Cadena crítica para resolver un problema RCPSP considerando riesgos y probabilidades, y la comparación con un modelo de programación lineal propuesto por (Ortiz Pimiento, 2020), cada proyecto contempla únicamente uno de los cuatro recursos renovables que contiene. Ambas propuestas comparten la misma clasificación para la identificación de riesgos, asumiéndolos como eventos independientes y manteniendo constante la probabilidad de ocurrencia a lo largo de la actividad.

5.2. Ejecución de la técnica propuesta

5.2.1. Tiempos de actividad

En esta fase de la investigación, se propone agregar a la duración de la actividad (b_i) los tiempos resultantes de los riesgos externos (h_{rj}) que pueden surgir en el transcurso de la ejecución del proyecto, dando como resultado, una nueva duración de actividad d_{ri} . Se plantean dos formas de calcular la duración de actividad, se sugiere remitirse al Apéndice A. Cuadro de riesgos para actividades, para una mejor visualización:

Procedimiento A. Este procedimiento se basa en que cada actividad del proyecto puede tener un riesgo o riesgos externos asociados (h_{rj}), los cuales pueden añadir o disminuir la duración de la actividad b_i , dando como resultado una nueva duración no determinística d_{ri}^A .

$$d_{ri}^A = b_i + \sum_{j=1}^n h_{rj} \quad (5.3)$$

Procedimiento B. De acuerdo con (Heldman, 2005), la exposición de un riesgo puede calcularse multiplicando la probabilidad de ocurrencia RP_{rj} , por el impacto esperado del mismo Ru_j . En este contexto, la suma de los impactos individuales da como resultado el impacto global de los riesgos asociados a la actividad. De manera que la nueva duración estimada d_{ri}^B se determina al sumar la duración de la actividad (b_i) y el impacto global de los riesgos. Este enfoque proporciona una duración determinística ajustada a los posibles riesgos.

$$d_{ri}^B = b_i + \sum_{j=1}^n (Ru_j * RP_{ji}) \quad (5.4)$$

5.2.2. Alternativas de Buffer

Una vez calculada la nueva duración de actividades teniendo en cuenta los riesgos externos que podrían afectar cada actividad, es esencial determinar el tamaño del buffer. En esta etapa de la investigación, se prioriza inicialmente el cálculo del **buffer de proyecto**. De acuerdo con (Jo et al., 2018), este buffer desempeña una función crucial al proteger la fecha objetivo del proyecto a lo largo de la cadena crítica. Por ello, se proponen tres alternativas para poder calcular el buffer como se describe a continuación:

- **Alternativa 1.** Esta alternativa opta por utilizar el método de (Cut & Paste Method-C&PM) descrito por (Jan & Ho, 2006), el cual plantea utilizar dos estimaciones de tiempo, siendo W_i para la duración proyectora y D_i para la estimación razonable. Dado que, en este punto, las duraciones de las actividades son obtenidas a partir de la ecuación (5.3), es necesario generar una muestra de 100 duraciones aleatorias para cada actividad del proyecto para así poder generar una duración determinística (Apéndice C. Buffer). Una vez que se hayan generado los datos, se calcula W_i y D_i y por último el buffer de

proyecto (**PB**) para cada uno de los proyectos seleccionados anteriormente. Se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$W_i = \max[\{(d)_{r1}^A\}, \{(d)_{r2}^A\}, \{(d)_{r3}^A\} \dots \{(d)_{r100}^A\}] \quad (5.5)$$

$$D_i = \text{prom}[\{(d)_{r1}^A\}, \{(d)_{r2}^A\}, \{(d)_{r3}^A\} \dots \{(d)_{r100}^A\}] \quad (5.6)$$

$$PB = 0.5 \left[\sum (W_i - D_i) \right] \quad (5.7)$$

- **Alternativa 2.** En esta alternativa, se identifican inicialmente la media esperada (Ru_j) para los riesgos externos negativos asociados a cada actividad del proyecto, los cuales añaden tiempo a la duración de la actividad b_i . Se determina el valor máximo de las duraciones medias esperadas por actividad, para posteriormente realizar una sumatoria de estos valores; dando como resultado el buffer de proyecto (**PB**); se sugiere consultar el Apéndice C. Buffer para una visión detallada. Este cálculo se representa en la siguiente ecuación:

$$PB = \sum_{j=1}^n [\max(Ru_j)] \quad (5.8)$$

Donde:

- **PB** es el buffer del proyecto, es decir, la suma de los valores máximos de las duraciones esperadas medias de los riesgos externos negativos asociados a todas las actividades del proyecto.
- n es el número total de actividades en el proyecto.
- $\max(Ru_j)$ representa el valor máximo de las duraciones esperadas medias de los riesgos negativos para la actividad i

- **Alternativa 3.** Esta alternativa se destaca por incorporar la probabilidad de ocurrencia de los riesgos externos que impactan las actividades del proyecto. Inicialmente se identifican los riesgos negativos externos asociados a cada actividad, considerando tanto su duración esperada media (Ru_j) como su probabilidad de ocurrencia esperada (RP_{ji}). A continuación, se procede a calcular el producto de cada media esperada por su respectiva probabilidad de ocurrencia para cada riesgo asociados a una actividad. Los resultados obtenidos de este cálculo se suman para obtener el buffer de proyecto (PB); se sugiere consultar el Apéndice D. Buffer para una visión detallada. Este cálculo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$PB = \sum_{j=1}^n (Ru_j * RP_{ji}) \quad (5.9)$$

5.2.3. Obtención de las líneas-base

Diversos autores (Cox & Schleier, 2010; Newbold, 1998; Spundak et al., 2008; Tukul et al., 2006), han propuesto variaciones en la construcción del modelo de cadena crítica. Por ello, en esta investigación se ha decidido emplear un método estándar con ciertas adaptaciones, detallada a continuación. Para una mejor comprensión y visualización, se recomienda consultar el Apéndice D. Construcción CCPM.

- Elaborar un plan inicial utilizando CPM/PERT con una programación tan pronto como sea posible (As Soon As Possible - ASAP). En este plan, se establece la duración promedio razonable para las actividades (se obtienen a partir de las ecuaciones (5.3 – 5.4), además de solo tener en cuenta las precedencias propias del proyecto y no los recursos que están asignados a cada actividad.

- Identificar la ruta crítica como la ruta de actividades en la que la holgura sea igual a cero realizada en el paso anterior.
- Una vez realizado el CPM, se procede a añadir los recursos a las tareas del proyecto y resolver los conflictos eliminando las sobrecargas
- Para poder utilizar posteriormente un SGS en paralelo, se añade una regla de prioridad a cada proyecto basado en el ASAP. Esta regla dará prioridad a la actividad que inicia más pronto (IC)
- Una vez obtenidas la ruta crítica y la lista de prioridades para cada actividad del proyecto, se procede a realizar la estrategia reactiva del SGS en paralelo, utilizando la programación en GAMS. Dicha programación, considera las precedencias, duraciones estimadas, cantidad de precedencias, cantidad y distribución de recursos. Una vez calculado el SGS, se obtiene la línea-base (los tiempos de inicio de cada actividad, junto con el makespan teórico), como se observa en la Figura 12. Es importante señalar que este paso se debe repetir para cada una de las técnicas derivadas del método CCPM y el modelo PLE, ya que las duraciones de actividad varían debido al proceso que les corresponde. Así mismo, aquellas actividades que no generen resultados se consideran con una duración de cero. En la programación de GAMS, se incluyen las actividades ficticias de inicio y fin. Por lo tanto, al asignar las duraciones a las actividades según la lista de prioridad, es crucial tener en cuenta la actividad menos 1, asegurando así una asignación correcta.

Figura 12. Resultado SGS en paralelo

```

PROYECTO 1 - copia.lst
673
674 display ii;

COMPILATION TIME      =      0.000 SECONDS      3 MB 45.3.0 c4c31d8a WEX-WEI
GAMS 45.3.0 c4c31d8a Nov 11, 2023      WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/23 09:46:39 Page 2
General Algebraic Modeling System
Execution

---- 674 PARAMETER ii tiempo donde inicia cada actividad segun SGS

3  9.000,  5  5.000,  6  9.000,  7  15.000,  8  15.000,  9  15.000
10 5.000, 11  9.000, 12 24.000, 13 16.000, 14 25.000, 15 16.000
16 11.000, 17 27.000, 18 21.000, 19 24.000, 20 28.000, 21 21.000
22 34.000, 23 42.000, 24 44.000, 25 34.000, 26 19.000, 27 24.000
28 35.000, 29 26.000, 30 48.000, 31 39.000, 32 49.000

EXECUTION TIME      =      0.015 SECONDS      4 MB 45.3.0 c4c31d8a WEX-WEI

USER: GAMS Demo, for EULA and demo limitations see  G230930/0001CB-GEN
https://www.gams.com/latest/docs/UG%5FLicense.html      DC0000

```

Nota. Elaboración Propia

- Añadir el buffer de proyecto al final de la cadena crítica dimensionándolo con el procedimiento que se crea oportuno (en esta investigación se tienen tres alternativas descritas anteriormente)

5.3. Comparación de las líneas-base obtenidas

En relación con la técnica propuesta en esta investigación, se presentan tres enfoques diferentes. La técnica I sigue una dinámica inicial de crear un plan CPM/PERT (ASAP), asignando a las actividades una duración razonable, la cual es calculada con la ecuación (5.6) para cada actividad de los proyectos previamente seleccionados. Luego, se añaden los recursos y precedencias correspondientes para cada proyecto. Una vez obtenido el plan CPM, se identifica la ruta crítica y se establece una regla de prioridad para cada proyecto, dando preferencia a las actividades que comienzan más temprano, y finalmente, se calcula el buffer de proyecto a partir de la ecuación (5.7).

La técnica II, sigue una dinámica similar. Inicialmente, se crea un plan CPM/PERT (ASAP) asignando a las actividades una duración estimada, la cual es calculada con la ecuación (5.4). Posteriormente, se añaden los recursos y precedencias para cada proyecto, se identifica la cadena ruta crítica y se establece una regla de prioridad para cada proyecto, priorizando las actividades que inicien más pronto. Finalmente, se calcula el buffer de proyecto mediante la ecuación (5.8).

La técnica III sigue una dinámica análoga. Se crea inicialmente un plan CPM/PERT (ASAP) asignando a las actividades una duración estimada, según la ecuación (5.4) para las actividades de los proyectos seleccionados. Posteriormente, se agregan los recursos y precedencias correspondientes para cada actividad, se identifica la ruta crítica y se establece una regla de prioridad para cada proyecto, priorizando las actividades que inicien más temprano, y finalmente, se calcula el buffer de proyecto mediante la ecuación (5.9).

Con las líneas-base generadas en el numeral anterior, se procede, a realizar la comparación con la propuesta presentada en la tesis doctoral “*Modelo de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria*” (Ortiz Pimiento, 2020). Dicho modelo consiste en cuatro etapas: Identificación de riesgos, estimación de la duración de las actividades a partir de procedimientos alternativos basados en el método de duraciones redundantes, generación de línea-base y selección del procedimiento que genera la línea-base más robusta. Es importante señalar que en esta investigación hay dos formas de calcular la duración de la actividad con riesgos a través de las ecuaciones (5.3 – 5.4). Por ello, se opta por utilizar la ecuación (5.4) en el modelo propuesto por (Ortiz Pimiento, 2020), ya que representa el procedimiento más robusto que generó resultados satisfactorios en su tesis doctoral.

A continuación, se relaciona el modelo de optimización y las variables de decisión propuestas por (Ortiz Pimiento, 2020), el cual está formulado como un programa lineal entero en tiempo discreto para resolver el RCPSP, además de estar programado en GAMS y resuelto usando el Solver MIP de CPLEX:

Variables de decisión:

- S_j : Representa el tiempo de inicio planeado para la actividad i
- A_{it} : Variable binaria que señala si la actividad i se ejecuta en el periodo t . (A_{it} es igual a 1 si la actividad i esta activa en el periodo t , e igual a cero en caso contrario)

$$\text{Min } S_n \tag{5.10}$$

Sujeto a:

$$S_j \geq P_{ij} * [S_i + d_i] \forall i, \forall j \tag{5.11}$$

$$S_i + d_i - 1 \geq t * A_{it} \forall i, \forall t \tag{5.12}$$

$$S_i \leq [t + (1 - A)_{it}] * M \forall i, \forall t \tag{5.13}$$

$$\sum_{t=1}^T A_{it} = d_i \forall i \tag{5.14}$$

$$\sum_{t=1}^n [(r)_{ik} * A_{it}] \leq R w_{kt} \forall k, \forall t \tag{5.15}$$

$$S_i \geq 0 \text{ entero } \forall i \tag{5.16}$$

$$A_{it} \in \{0,1\} \forall i, \forall t \tag{5.17}$$

La función objetivo de este modelo es minimizar el makespan del proyecto (S_n). Por ello, la ecuación (5.11) establece que las actividades comiencen sólo cuando las actividades anteriores hayan finalizado. La ecuación (5.12) permite que la variable binaria A_{it} sea 1 solo si la actividad i no ha finalizado en el momento t ; así mismo, la ecuación (5.13) establece que A_{it} es 1 solo si la actividad i inicio después del momento t (M representa un número muy grande), y la ecuación (5.14) asegura que A_{it} sea 1 para el intervalo $[\{S\}_i, S_i + d_i \}$.

Por otra parte, la ecuación (5.15) posibilita la programación simultánea de varias actividades, siempre y cuando no se excedan los recursos disponibles. Finalmente, las ecuaciones (5.16 – 5.17) establecen las condiciones de no negatividad y el tipo de variable requerido. Adicional a estas restricciones, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones dadas por (Ortiz Pimiento, 2020):

- Inicialmente en la tesis doctoral se utilizó duraciones de actividad a partir de métodos basados en redundancias.
- Debido a que el modelo matemático es formulado en tiempo discreto con variables tipo On/Off; es necesario que las duraciones obtenidas se redondeen al valor entero más cercano.
- El modelo propuesto sólo tiene en cuenta los recursos renovables del proyecto.
- El modelo propuesto puede resolver problemas j30, j60 y j90 en poco tiempo.

5.4. Simulación de Montecarlo

Con el objetivo de evaluar en términos de robustez tanto el método propuesto en esta investigación como del propuesto por (Ortiz Pimiento, 2020), se lleva a cabo un proceso de simulación de 10000 posibles escenarios de ejecución para cada proyecto a través del simulador

desarrollado por (Mantilla Romero & Latorre Ramirez, 2022) en el proyecto de grado “*Desarrollo de un simulador para evaluar estrategias en programación de proyectos con recursos restringidos y duración de actividades aleatorias*”. Los parámetros de entrada del simulador requieren la obtención de un listado de prioridades (Esta regla de prioridad se obtuvo a partir del orden en que aparecen las actividades programadas en cada una de las líneas-base propuestas) y los tiempos de inicio de cada actividad, los cuales se obtiene mediante el desarrollo de una estrategia reactiva diseñada para simular la ejecución real de cada proyecto. Es importante destacar que las líneas-base, obtenidas por medio del método de la cadena crítica se generaron a partir de un SGS en paralelo, como se detalló en el numeral anterior.

El simulador que se emplea para este análisis de robustez facilita la ejecución de la simulación Montecarlo y el cálculo de las ecuaciones (4.10 – 4.11), obteniendo así los indicadores de robustez para cada proyecto y una distribución de probabilidad para el makespan real. Para comprender mejor los parámetros de entrada del simulador, se recomienda consultar el Apéndice E. Simulador de Montecarlo para obtener una comprensión más detallada.

6. Análisis de Resultados

6.1. Indicadores de Robustez y Makespan

Una vez realizada la simulación de Montecarlo para cada uno de los proyectos ejecutados en cada una de las propuestas, se obtienen tanto el Makespan Real como los indicadores de robustez. En la Tabla 4 se pueden observar los makespan reales calculados por cada propuesta dada en esta investigación, además de la línea-base que se obtiene por medio del modelo basado en PLE.

En términos generales, los métodos empleados demuestran ser eficientes, permitiendo su comparación en cuanto a su rendimiento. Sin embargo, se observa que, en la mayoría de los casos, el modelo PLE optimizó de manera destacada los tiempos de ejecución de cada proyecto, generando makespan menores al de las demás alternativas. Esto podría sugerir un avance significativo en la resolución de la pregunta de investigación presente en este documento.

Tabla 4. *Makespan Reales*

	Técnica I	Técnica II	Técnica III	Modelo PLE
Proyectos	Makespan Real	Makespan Real	Makespan Real	Makespan Real
Proyecto 1	52,19	52,54	52,57	48,46
Proyecto 2	58,85	58,8	58,87	54,68
Proyecto 3	45,97	50,16	50,22	45,40
Proyecto 4	58,98	58,95	58,97	59,00
Proyecto 5	51,47	50,44	50,42	50,17
Proyecto 6	70,36	70,37	70,29	60,52
Proyecto 7	73,66	75,74	75,78	54,63
Proyecto 8	74,45	74,87	74,88	67,14
Proyecto 9	70,61	72,16	72,05	71,61
Proyecto 10	67,01	64,81	64,78	64,79
Proyecto 11	51,89	52,34	52,34	52,31
Proyecto 12	50,66	48,08	48,10	49,02
Proyecto 13	54,11	52,81	52,72	52,75
Proyecto 14	114,6	115,76	115,75	94,59
Proyecto 15	74,50	75,47	75,42	64,93
Proyecto 16	58,02	60,55	60,46	52,87
Proyecto 17	90,27	92,91	92,83	74,5
Proyecto 18	73,43	73,74	73,72	65,92

Nota. Elaboración propia Makespan Esperado

De acuerdo con los indicadores obtenidos para la robustez de solución (SR) y robustez de calidad (QR), el modelo PLE es capaz de mantener un rendimiento constante y proporcionar resultados confiables teniendo en cuenta los posibles riesgos que están expuestas las actividades de cada proyecto. Así mismo, la técnica II tiene el peor desempeño en la robustez de calidad (QR) entre las técnicas propuestas y modelo PLE, lo que podría sugerir un sobredimensionamiento en el buffer de proyecto correspondiente.

Tabla 5. *Indicadores de Robustez*

Proyectos	Técnica I		Técnica II		Técnica III		Modelo PLE	
	QR1	SR1	QR2	SR2	QR3	SR3	QR	SR
Proyecto 1	31,81	203,22	67,68	212,97	16,65	213,22	10,47	113,19
Proyecto 2	11,66	155,02	28,08	160,32	3,94	160,82	8,68	94,85
Proyecto 3	25,03	51,2	39,37	66,38	6,16	66,8	2,34	42,37
Proyecto 4	41,02	68,62	44,43	76,16	6,02	76,58	4,25	76,66
Proyecto 5	16,53	67,47	34,64	76,93	4,01	76,29	5,19	73,03
Proyecto 6	13,14	110,61	29,57	153,98	2,98	153,13	9,52	136,33
Proyecto 7	3,33	358,11	18,51	253,46	13,17	253,83	8,63	109,74
Proyecto 8	21,55	366,47	43,44	239,29	6,08	239,25	9,14	116,15
Proyecto 9	9,41	311,92	24,42	617,53	4,58	315,12	12,80	414,86
Proyecto 10	14	150,59	39,66	129,9	3,13	129,11	9,79	129,28
Proyecto 11	14,61	102,74	35,33	88,84	2,56	88,89	8,31	88,34
Proyecto 12	13,85	154,9	28,23	101,88	2,83	102,84	12,02	108,02
Proyecto 13	16,89	132,96	40,16	110,2	4,94	109,07	8,76	109,12
Proyecto 14	19,9	423,24	31,17	479,66	4,14	479,93	12,59	154,92
Proyecto 15	4,38	272,05	18,77	265,31	9,89	264,9	8,94	124,51
Proyecto 16	12,99	137,57	30,76	219,94	7,48	219,44	9,87	137,75
Proyecto 17	12,24	272,53	24,97	314,36	7,95	312,94	11,5	162,65
Proyecto 18	4,62	248,87	28,03	239,4	4,55	239,11	11,92	65,92

Nota. Elaboración propia Indicadores de Robustez

6.2. Resultados entre alternativas propuestas

6.2.1. Criterios de evaluación: Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia

Entre los criterios de evaluación presentes en esta investigación se tomó el makespan e indicadores de robustez, cuyo orden de importancia varía según las necesidades de los interesados y el contexto que lo rodea. En esta sección, los criterios de evaluación se mantienen con la misma relevancia, con el objetivo de observar el desempeño de las alternativas propuestas en esta investigación. Para poder calcular qué alternativa es más robusta, se propone la suma del makespan con los indicadores de robustez, seguido por la determinación del valor mínimo obtenido. En la Tabla 6 se puede observar cual alternativa presenta la mayor robustez en función de la combinación de makespan e indicadores de robustez.

Tabla 6. *Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia*

Proyectos	Técnica I	Técnica II	Técnica III	Resultado
Proyecto 1	287,22	333,19	282,44	Técnica III
Proyecto 2	225,53	247,2	223,63	Técnica III
Proyecto 3	122,2	155,91	123,18	Técnica I
Proyecto 4	168,62	179,54	141,57	Técnica III
Proyecto 5	135,47	162,01	130,72	Técnica III
Proyecto 6	194,11	253,92	226,4	Técnica I
Proyecto 7	435,1	347,71	342,78	Técnica III
Proyecto 8	462,47	357,6	320,21	Técnica III
Proyecto 9	391,94	714,11	391,75	Técnica III
Proyecto 10	231,6	234,37	197,02	Técnica III
Proyecto 11	169,24	176,51	143,79	Técnica III
Proyecto 12	219,41	178,19	153,77	Técnica III
Proyecto 13	203,96	203,17	166,73	Técnica III
Proyecto 14	557,74	626,59	599,82	Técnica I

Proyecto 15	350,93	359,55	350,21	Técnica III
Proyecto 16	208,58	311,25	287,38	Técnica I
Proyecto 17	375,04	432,24	413,72	Técnica I
Proyecto 18	326,92	341,17	317,38	Técnica III

Nota. Elaboración propia Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia

En la Tabla 7 se presenta la cantidad de proyectos en los cuales las técnicas propuestas obtuvieron mejor calificación, reflejando así una mayor robustez. Destaca que la técnica III se posiciona como la mejor adaptación del modelo CCPM propuesto en esta investigación, alcanzando una tasa de aceptación del 72,22% (13 proyectos).

Tabla 7. *Resultados de Criterios de Evaluación*

Enfoque del modelo C&PM	Proyectos	Porcentaje Participación
Técnica I	5	27,78%
Técnica II	0	0,00%
Técnica III	13	72,22%
TOTAL	18	100%

Nota. Elaboración propia Resultados de Criterios de Evaluación

6.2.2. Criterios de evaluación: Mayor relevancia Makespan sobre los Indicadores de robustez.

Aunque el orden de importancia de los criterios de evaluación depende de las necesidades de los interesados y el contexto que rodea cada proyecto, se establece que el primer criterio prioritario es el makespan. Esto se debe a la importancia de completar un proyecto en el menor tiempo posible en la práctica, a pesar de la posibilidad de que puedan surgir riesgos positivos o negativos que afecten la duración de las actividades. A continuación, los criterios secundarios son el indicador de robustez (QR) y, posteriormente el indicador de robustez (SR). Estos últimos son

esenciales para soportar las interrupciones que afectan la fecha de finalización del proyecto y los tiempos de inicio de cada actividad, respectivamente.

Una vez establecidas las prioridades de los criterios de evaluación, la Tabla 8 permite visualizar cuál alternativa presenta la mayor robustez, considerando en primer lugar la prioridad del Makespan, seguido por el indicador de robustez (QR) y, finalmente, el indicador de robustez (SR). Este cálculo se deriva de una ponderación, asignando un valor específico a cada criterio. En este caso, el Makespan tiene un peso de 7, el indicador (QR) un peso de 2 y el indicador (SR) un peso de 1.

Tabla 8. *Makespan mayor relevancia sobre Indicadores de Robustez*

Proyectos	Técnica I	Técnica II	Técnica III	Resultado
Proyecto 1	632,17	716,11	614,51	Técnica III
Proyecto 2	590,29	628,08	580,79	Técnica III
Proyecto 3	423,05	496,24	430,66	Técnica I
Proyecto 4	563,52	577,67	501,41	Técnica III
Proyecto 5	460,82	499,29	437,25	Técnica III
Proyecto 6	629,41	705,71	651,12	Técnica I
Proyecto 7	880,39	820,66	810,63	Técnica III
Proyecto 8	930,72	850,26	775,57	Técnica III
Proyecto 9	825,01	1.171,49	828,63	Técnica I
Proyecto 10	647,66	662,89	588,83	Técnica III
Proyecto 11	495,19	525,88	460,39	Técnica III
Proyecto 12	537,22	494,90	445,20	Técnica III
Proyecto 13	545,51	560,19	487,99	Técnica III
Proyecto 14	1.265,24	1.352,32	1.298,46	Técnica I
Proyecto 15	802,31	831,14	812,62	Técnica I
Proyecto 16	569,69	705,31	657,62	Técnica I
Proyecto 17	928,90	1.014,67	978,65	Técnica I

Proyecto 18	772,12	811,64	764,25	Técnica III
-------------	--------	--------	--------	-------------

Nota. Elaboración propia Makespan mayor relevancia sobre Indicadores de Robustez

En la Tabla 9, se detalla la cantidad de proyectos en los cuales las técnicas propuestas obtuvieron mejor calificación, evidenciando así una mayor robustez. Destaca que la técnica III se posiciona como la mejor adaptación del modelo CCPM propuesto en esta investigación, alcanzando una tasa de aceptación del 61,12% (11 proyectos). Además, se observa un aumento en la cantidad de proyectos en que la técnica I con una tasa de aceptación del 38,88% (7 proyectos), en comparación con el anterior criterio de evaluación en la que tanto el makespan e indicadores de robustez tenían la misma relevancia. Por otro lado, se observa que la técnica II presenta el peor desempeño entre las técnicas evaluadas.

Tabla 9. *Resultados Criterios de Evaluación*

Enfoque del modelo C&PM	Proyectos	Porcentaje Participación
Técnica I	7	38,88%
Técnica II	0	0,00%
Técnica III	11	61,12%
TOTAL	18	100%

Nota. Elaboración propia Resultados Criterios de Evaluación

6.3. Resultados de comparativa entre CCPM y PLE

6.3.1. Criterios de evaluación: Makespan e Indicadores de robustez con igual relevancia

Para iniciar la comparación entre las técnicas derivadas del CCPM y el modelo PLE, se opta por comenzar con los criterios de evaluación asignándoles la misma relevancia. El propósito es observar de manera uniforme el desempeño de ambos modelos en esta investigación.

Con el objetivo de determinar cuál alternativa es más robusta, se propone la suma del makespan con los indicadores de robustez, seguido por la identificación del valor mínimo obtenido. La Tabla 10 ofrece una visión detallada de cual técnica derivada del CCPM y modelo PLE presenta la mayor robustez, considerando la combinación de makespan e indicadores de robustez.

Tabla 10. *CCPM y PLE: Makespan e Indicadores de robustez igual relevancia*

Proyectos	Técnica I	Técnica II	Técnica III	Modelo PLE	Resultado
Proyecto 1	287,22	333,19	282,44	172,12	Modelo PLE
Proyecto 2	225,53	247,20	223,63	158,21	Modelo PLE
Proyecto 3	122,20	155,91	123,18	90,11	Modelo PLE
Proyecto 4	168,62	179,54	141,57	139,91	Modelo PLE
Proyecto 5	135,47	162,01	130,72	128,39	Modelo PLE
Proyecto 6	194,11	253,92	226,40	206,37	Técnica I
Proyecto 7	435,10	347,71	342,78	173,00	Modelo PLE
Proyecto 8	462,47	357,60	320,21	192,43	Modelo PLE
Proyecto 9	391,94	714,11	391,75	499,27	Técnica III
Proyecto 10	231,60	234,37	197,02	203,86	Técnica III
Proyecto 11	169,24	176,51	143,79	148,96	Técnica III
Proyecto 12	219,41	178,19	153,77	169,06	Técnica III
Proyecto 13	203,96	203,17	166,73	170,63	Técnica III
Proyecto 14	557,74	626,59	599,82	262,10	Modelo PLE
Proyecto 15	350,93	359,55	350,21	198,38	Modelo PLE
Proyecto 16	208,58	311,25	287,38	200,49	Modelo PLE
Proyecto 17	375,04	432,24	413,72	248,65	Modelo PLE
Proyecto 18	326,92	341,17	317,38	143,76	Modelo PLE

Nota. Elaboración propia CCPM y PLE: Makespan e Indicadores de robustez igual relevancia

En la Tabla 11 se presenta la cantidad de proyectos en los cuales las técnicas propuestas derivadas del CCPM y el modelo PLE obtuvieron mejor calificación, reflejando así una mayor robustez. Se destaca que el modelo PLE se posiciona como la mejor opción para generar líneas-base robustas, alcanzando una tasa de aceptación del 66,67% (12 proyectos). Así mismo, la técnica II ha generado líneas-base robustas con una tasa de aceptación del 27,77% (5 proyectos), mientras que la técnica I ha logrado una tasa de aceptación del 5,56% (1 proyecto).

Tabla 11. Resultado comparativo de Criterios de evaluación: CCPM y PLE

Modelos	Proyectos	Porcentaje Participación
Técnica I	1	5,56%
Técnica II	0	0,00%
Técnica III	5	27,77%
Modelo PLE	12	66,67%
TOTAL	18	100%

Nota. Elaboración propia. Resultado comparativo de Criterios de evaluación: CCPM y PLE

6.3.2. Criterios de evaluación: Mayor relevancia Makespan sobre los Indicadores de robustez.

Aunque el orden de importancia de los criterios de evaluación puede variar según las necesidades de los interesados y el contexto específico de cada proyecto, se establece que el primer criterio prioritario es el makespan. Esto se debe a la importancia de completar un proyecto en el menor tiempo posible en la práctica, a pesar de la posibilidad de que puedan surgir riesgos positivos o negativos que afecten la duración de las actividades. A continuación, los criterios secundarios son el indicador de robustez (QR) y, posteriormente el indicador de robustez (SR). Estos últimos son esenciales para soportar las interrupciones que afectan la fecha de finalización del proyecto y los tiempos de inicio de cada actividad, respectivamente.

Una vez establecidas las prioridades de los criterios de evaluación, la Tabla 12 permite visualizar qué técnica, ya sea derivadas en CCPM o el modelo PLE, presenta la mayor robustez. Este análisis considera en primer lugar la prioridad del Makespan, seguido por el indicador de robustez (QR) y, finalmente, el indicador de robustez (SR). Este cálculo se deriva de una ponderación, asignando un valor específico a cada criterio. En este caso, el Makespan tiene un peso de 7, el indicador (QR) un peso de 2 y el indicador (SR) un peso de 1

Tabla 12. CCPM y PLE: Makespan mayor relevancia sobre Indicadores de Robustez

Proyectos	Técnica I	Técnica II	Técnica III	Modelo PLE	Resultado
Proyecto 1	632,17	716,11	614,51	473,35	Modelo PLE
Proyecto 2	590,29	628,08	580,79	494,97	Modelo PLE
Proyecto 3	423,05	496,24	430,66	364,85	Modelo PLE
Proyecto 4	563,52	577,67	501,41	498,16	Modelo PLE
Proyecto 5	460,82	499,29	437,25	434,60	Modelo PLE
Proyecto 6	629,41	705,71	651,12	579,01	Modelo PLE
Proyecto 7	880,39	820,66	810,63	509,41	Modelo PLE
Proyecto 8	930,72	850,26	775,57	604,41	Modelo PLE
Proyecto 9	825,01	1.171,49	828,63	941,71	Técnica I
Proyecto 10	647,66	662,89	588,83	602,39	Técnica III
Proyecto 11	495,19	525,88	460,39	471,13	Técnica III
Proyecto 12	537,22	494,90	445,20	475,20	Técnica III
Proyecto 13	545,51	560,19	487,99	495,89	Técnica III
Proyecto 14	1.265,24	1.352,32	1.298,46	842,23	Modelo PLE
Proyecto 15	802,31	831,14	812,62	596,90	Modelo PLE
Proyecto 16	569,69	705,31	657,62	527,58	Modelo PLE
Proyecto 17	928,90	1.014,67	978,65	707,15	Modelo PLE
Proyecto 18	772,12	811,64	764,25	551,20	Modelo PLE

Nota. Elaboración propia CCPM y PLE: Makespan mayor relevancia sobre Indicadores de robustez.

En la Tabla 13, se detalla la cantidad de proyectos en los cuales las técnicas propuestas basadas en CCPM y el modelo PLE obtuvieron mejor calificación, evidenciando así una mayor robustez. Destaca que el modelo PLE ha incrementado la cantidad de proyectos en los cuales genera una línea-base robusta, alcanzando una destacada tasa de aceptación del 72,22% (13 proyectos) consolidándose como el modelo más efectivo en esta investigación. Además, se observa una ligera disminución en la cantidad de proyectos en los cuales la técnica III genera una línea-base robusta, con una tasa de aceptación del 22,22% (4 proyectos), en comparación con el anterior criterio de evaluación en la que tanto el makespan e indicadores de robustez tenían la misma relevancia. Por otro lado, se observa que la técnica II presenta el peor desempeño entre las técnicas evaluadas.

Tabla 13. CCPM y PLE: Resultado comparativo de Criterios de evaluación

Modelos	Proyectos	Porcentaje Participación
Técnica I	1	5,56%
Técnica II	0	0,00%
Técnica III	4	22,22%
Modelo PLE	13	72,22%
TOTAL	18	100%

Nota. Elaboración propia CCPM y PLE: Resultado comparativo de Criterios de evaluación

7. Conclusiones

La clasificación y aplicación eficiente de riesgos, que incluye tanto los aspectos positivos como los negativos junto con su probabilidad de ocurrencia, emergen como elementos claves para alcanzar resultados óptimos y beneficiosos. Esta importancia se destaca tanto en el método de cadena crítica (CCPM) como en la programación lineal entera (PLE), utilizados para resolver problemas de programación en proyectos con recursos limitados (RCPSP). Sin embargo, en la práctica, los gerentes de proyectos suelen eludir la realización de un análisis o evaluación de estos riesgos, optando en su lugar por reemplazar las variables aleatorias con valores promedio. Esta práctica conduce a resultados incorrectos en la planificación de los proyectos.

Transformar un método heurístico en uno determinístico en conjunto con un cálculo de buffer que considere la probabilidad de ocurrencia y un análisis de riesgos adecuado podría considerarse como una opción para abordar el problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP). Esta transformación nos permite obtener una línea-base sólida y robusta. Es relevante señalar que, aunque esta opción es válida, no necesariamente se presenta como la mejor alternativa disponible. El método determinístico de programación lineal entera (PLE), al incorporar un análisis de riesgos con su probabilidad de ocurrencia, nos permite obtener una línea-base más robusta según los resultados obtenidos a partir del análisis de indicadores de robustez y makespan.

Aunque se empleó el mismo método matemático para calcular los tiempos de inicio en las técnicas 2, 3 y el modelo (PLE), se evidenció en la técnica 2 que al considerar únicamente los riesgos externos negativos sin tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia al momento del cálculo del buffer, se obtiene un buffer y criterio de evaluación sobredimensionados lo cual se podría

traducirse en costos adicionales en términos de mano de obra, tiempos y recursos. Esta alternativa no genera una línea-base robusta para ninguno de los 18 proyectos seleccionados de la librería PSPLIB, pertenecientes al conjunto j30. Por lo tanto, se descarta por completo la técnica 2 como solución al problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP).

Entre las variantes del método de CCPM, la técnica 3 destaca como la más efectiva. Su característica más relevante, en comparación con las otras dos técnicas, reside en la formulación de su buffer, donde se considera la media esperada de los riesgos negativos y su respectiva probabilidad de ocurrencia. Esta formulación del buffer en la técnica 3 permite una planificación más precisa y adaptativa, ya que no solo se tiene en cuenta la posibilidad de riesgos negativos, que aumentan el tiempo de la actividad, sino que también se pondera su impacto a través de la probabilidad de ocurrencia.

La tesis de investigación demuestra el logro de sus objetivos al abordar el análisis de la robustez de líneas base en el problema RCPSP, considerando la duración aleatoria de actividades mediante la técnica de la Cadena Crítica (CCPM). También identifica los principales aportes de la literatura científica sobre las aplicaciones de la técnica CCPM en el RCPSP. La investigación incluye una propuesta para aplicar la técnica CCPM al RCPSP con duración aleatoria de actividades y concluye con una comparación de la robustez entre la(s) línea(s)-base generada(s) por la cadena crítica (CCPM) propuesta y la línea-base obtenida a través de programación lineal entera. En resumen, la tesis no solo alcanza sus objetivos, sino que también aporta al análisis crítico de la literatura y presenta una solución aplicable y comparativa para la variabilidad en la duración de actividades en el RCPSP.

8. Recomendaciones

Se recomienda tener en cuenta los cuatro recursos renovables de la librería PSPLIB para cada proyecto del conjunto j30, además de considerar diferentes distribuciones estadísticas para cada actividad. Esto permitirá tener escenarios más reales, permitiendo posibles sinergias o conflictos en la gestión de recursos y mejorando la coherencia en la toma de decisiones para una planificación efectiva de los proyectos.

Para esta investigación, como variación de la técnica de la cadena crítica (CCPM), se optó por el método de cortar y pegar (C&PM) debido a la facilidad de la fórmula y su amplio uso en la literatura. Aun así, consideramos que se puede ampliar el análisis al implementar un estudio de variación del método Raíz Cuadrada de la Suma de Cuadrados (SSQ), ya que este considera la variación conocida de la tarea en la duración. No obstante, es importante señalar que esto podría resultar en tamaños de buffer insuficientes para cadenas largas. Esta limitación podría contrarrestarse al considerar, en el cálculo del buffer, la media esperada de los riesgos y su probabilidad de ocurrencia, permitiendo obtener, posiblemente, una línea base más robusta que la programación lineal entera (PLE).

Se recomienda, para futuras investigaciones que aborden el problema de la programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) y duración de actividades aleatorias mediante la aplicación de la técnica de la cadena crítica (CCPM), profundizar en el análisis de los riesgos positivos externos. Aunque este aspecto no fue considerado en gran medida en el presente estudio, podría revelar información valiosa y contribuir a una comprensión más completa y refinada del enfoque propuesto.

Referencias Bibliográficas

Alipouri, Y., Sebt, M. H., Ardeshir, A., & Chan, W. T. (2019). Solving the FS-RCPSP with hyper-heuristics: A policy-driven approach. *Journal of the Operational Research Society*, 70(3), 403-419. <https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1441636>

Altarazi, F., & Bao, H. (2015). Investigating the impact of buffer size in critical chain management. *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2015)*, , 1-8.

Ansari, R., Khalilzadeh, M., & Hosseini, M. R. (2022). A multi-objective dynamic optimization approach to project schedule management: A case study of a gas field construction. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(3), 1005-1013.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12205-021-0410-5>

Aramesh, S., Mousavi, S. M., Mohagheghi, V., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2021). A soft computing approach based on critical chain for project planning and control in real-world applications with interval data. *Applied Soft Computing*, 98, 106915.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106915>

Brčić, M., Kalpic, D., & Fertalj, K. (2012). Resource constrained project scheduling under uncertainty: a survey. Paper presented at the *23rd Central European Conference on Information and Intelligent Systems*, 401-409.

Cox, J. F., & Schleier, J. G. (2010). *Theory of constraints handbook*. McGraw-Hill New York.

Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (2011). Robust project scheduling. *Foundations and Trends in Technology, Information and Operations Management*, 3(3), 201-376.

<https://doi.org/10.1561/02000000021>

Elmaghraby, S. E. (2005). On the fallacy of averages in project risk management. *European Journal of Operational Research*, 165(2), 307-313.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.003>

Fuentes, J., Ruiz, J. P., Valverde, N., & Navarro, E. (2019). Estudio del efecto de la estimación del tiempo y el tamaño del búfer de proyecto en el Método de la Cadena Crítica = Study of the effect of tasks duration and project buffer size estimation in the Critical Chain Method. *Anales De Edificación*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.20868/ade.2019.3910>

Greenslade, D., & Salmon, C., PhD. (2017). A Risk-based Critical Chain Project Buffer Sizing Methodology. *IIE Annual Conference.Proceedings*, , 1932-1937.

<https://www.proquest.com/scholarly-journals/risk-based-critical-chain-project-buffer-sizing/docview/1951122246/se-2?accountid=29068>

Hall, N. G. (2016). Research and teaching opportunities in project management. *Optimization challenges in complex, networked and risky systems* (pp. 329-388). INFORMS.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1287/educ.2016.0146>

Hartmann, S., & Briskorn, D. (2022). An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 297(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>

- Hazır, Ö., & Ulusoy, G. (2020). A classification and review of approaches and methods for modeling uncertainty in projects. *International Journal of Production Economics*, 223, 107522. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107522>
- Heldman, K. (2005). Risk Management: Project Managers Spotlight on. *Project Managers Spotlight On*,
- Herroelen, W., & Leus, R. (2004). Robust and reactive project scheduling: A review and classification of procedures. *International Journal of Production Research*, 42(8), 1599-1620. <https://doi.org/10.1080/00207540310001638055>
- Herroelen, W., De Reyck, B., & Demeulemeester, E. (1998). Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments. *Computers & Operations Research*, 25(4), 279-302. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00055-5)
- Jan, S., & Ho, S. P. (2006). Construction project buffer management in scheduling planning and control. Paper presented at the *2006 Proceedings of the 23rd International Symposium on Robotics and Automation in Construction*, 858-863.
- Jo, S., Lee, E., & Pyo, K. (2018). Integrating a procurement management process into critical chain project management (CCPM): A case-study on oil and gas projects, the piping process. *Sustainability*, 10(6), 1817. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su10061817>
- Kim, N., Moon, H., Son, B., & Park, M. (2021). Smart and robust critical chain scheduling for construction projects using buffer extraction. *International Journal of Sustainable Building*

Technology and Urban Development, 12(4), 394-409.

<https://doi.org/10.22712/susb.20210032>

Kolisch, R. (1996). Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation. *European Journal of Operational Research*, 90(2), 320-333. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00357-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00357-6)

Kulejewski, J., Ibadov, N., Rosłon, J., & Zawistowski, J. (2021). Cash flow optimization for renewable energy construction projects with a new approach to critical chain scheduling. *Energies*, 14(18), 5795. <https://doi.org/10.3390/en14185795>

Madrid Guiza, S. A., & Calderon Barreto, V. C. (2021). *Desarrollo de un algoritmo genético para resolver el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (rcpsp) con duración de actividades aleatorias soportado en un proceso de simulación de monte carlo* (Tesis).

http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=191219%2034

Mantilla Romero, L. M., & Latorre Ramirez, J. D. (2022). *Desarrollo de un simulador para evaluar estrategias en programación de proyectos con recursos restringidos y duración de actividades aleatorias* (Tesis). <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/11949>

Morillo, D., Moreno, L., & Diaz, J. (2014a). Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 2. *Ingeniería Y Ciencia*, 10(20), 203-227.

<http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n20/v10n20a13.pdf>

- Morillo, D., Moreno, L., & Díaz, J. (2014b). Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 1. *Ingeniería Y Ciencia*, 10(19), 247-271.
<http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n19/v10n19a13.pdf>
- Newbold, R. C. (1998). *Project management in the fast lane: applying the theory of constraints*. CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b18205>
- Ortiz Pimiento, N. R. (2020). *Modelo de solución al problema de programación de proyectos de desarrollo de nuevos productos con recursos restringidos, inserción de tareas y duración aleatoria* (Doctorado). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77448>
- Ortiz-Pimiento, N., & Diaz-Serna, F. (2018). The project scheduling problem with non-deterministic activities duration: A literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(1), 116-134. <https://doi.org/10.3926/jiem.2492>
- Pang, N., Su, H., & Shi, Y. (2018). Project robust scheduling based on the scattered buffer technology. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(4), 541. <https://doi.org/10.3390/app8040541>
- Pellerin, R., & Perrier, N. (2019). A review of methods, techniques and tools for project planning and control. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2160-2178.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1524168>
- Pellerin, R., Perrier, N., & Berthaut, F. (2020). A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 280(2), 395-416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.063>

- PMI. (2013). *El alto costo de un bajo desempeño.* (). <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse/the-high-cost-of-low-performance-2013>
- Q. Shi, & T. Gong. (2009). An Improved Project Buffer Sizing Approach to Critical Chain Management Under Resources Constraints and Fuzzy Uncertainty. Paper presented at the - 2009 *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, , 1 486-490. <https://doi.org/10.1109/AICI.2009.192>
- Reyes, J. N. E. (2015). Análisis de la gestión de proyectos a nivel mundial. *Palermo Business Review*, (12), 61-98. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/análisis-de-la-gestión-proyectos-nivel-mundial/docview/1772123988/se-2?accountid=29068>
- Roghianian, E., Alipour, M., & Rezaei, M. (2018). An improved fuzzy critical chain approach in order to face uncertainty in project scheduling. *International Journal of Construction Management*, 18(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/15623599.2016.1225327>
- Shariatmadari, M., & Nahavandi, N. (2020). A new resource buffer insertion approach for proactive resource investment problem. *Computers and Industrial Engineering*, 146 <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106582>
- She, B. (2020). *Critical Chain Identification and Buffer Sizing for Efficient Project Management* (Ph.D.). Available from ProQuest One Academic. (2685378961). <http://wrap.warwick.ac.uk/162584/>
- Spundak, M., Fertalj, K., & Kalpic, D. (2008). *Is Critical Chain Project Management Really a Novel Technique?*. Faculty of Organization and Informatics Varazdin.

Tautiva Quinche, D. G., & Fuentes Luna, K. S. (2021). *Desarrollo de un algoritmo genético para resolver el problema de programación de proyectos con recursos restringidos (rcpsp) con duración de actividades aleatorias soportado en un método basado en duraciones redundantes* (Tesis).

http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=190404%202|4

Tukel, O. I., Rom, W. O., & Eksioglu, S. D. (2006). An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. *European Journal of Operational Research*, 172(2), 401-416.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.10.019>

Ulusoy, G., & Hazır, Ö. (2021). Project Scheduling Under Uncertainty. In G. Ulusoy, & Ö Hazır (Eds.), *An Introduction to Project Modeling and Planning* (pp. 357-379). Springer

International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61423-2_12

W. Wang, X. Ge, L. Li, & J. Su. (2019). *Proactive and Reactive Multi-Project Scheduling in Uncertain Environment* <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926337>

Wu, S. D., Storer, R. H., & Pei-Chann, C. (1993). *One-machine rescheduling heuristics with efficiency and stability as criteria*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi->

[org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/0305-0548\(93\)90091-V](https://doi.org/https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/0305-0548(93)90091-V)

Yongyi Shou, & K. T. Yao. (2000). Estimation of project buffers in critical chain project management. Paper presented at the - *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology. ICMIT 2000. 'Management in*

the 21st Century' (Cat. no.00EX457), , 1 162-167 vol.1.

<https://doi.org/10.1109/ICMIT.2000.917313>

Zarghami, S. A., Gunawan, I., Corral de Zubielqui, G., & Baroudi, B. (2020). Incorporation of resource reliability into critical chain project management buffer sizing. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6130-6144.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1667041>

Zhang, J., Song, X., & Díaz, E. (2017). Critical chain project buffer sizing based on resource constraints. *International Journal of Production Research*, 55(3), 671-683.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1200151>

Zohrehvandi, S. (2022). A Project-Scheduling and Resource Management Heuristic Algorithm in the Construction of Combined Cycle Power Plant Projects. *Computers*,

11(2)<https://doi.org/10.3390/computers11020023>

Zohrehvandi, S., Khalilzadeh, M., Amiri, M., & Shadrokh, S. (2022). Project buffer sizing and dynamic buffer consumption algorithm in power generation construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(2), 716-738.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2020-0605>

Zohrehvandi, S., & Shahzileh, Z. H. (2022). A heuristic algorithm in project scheduling and project time optimization: through managing the size of the project buffer, feeding buffers, and resource buffers. *Procedia Computer Science*, 204, 891-899.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.108>