

Estudio Comparativo de Duraciones entre el Método de Cadena Crítica y el Método de Ruta
Crítica en un Proyecto de Adecuación

Luisa Fernanda Escobar Gómez

Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniera Civil

Director

Homer Armando Buelvas Moya
Magister en ingeniería estructural y evaluación y gestión de proyectos

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, familiares y amigos que estuvieron presentes en cada paso de mi formación académica, su apoyo y amor incondicional fueron mi motor para luchar por lograr mis aspiraciones. También agradezco al profesor Homer Buelvas por depositar su confianza en mí, compartir su conocimiento y guiarme en las diferentes etapas de mi carrera universitaria.

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General.....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco de Referencia	13
2.1 Marco Conceptual.....	13
2.1.1 Entregables.....	13
2.1.2 Fase de Planificación	13
2.1.3 Fase de Ejecución	13
2.1.4 Fase de Monitoreo y Control	13
2.1.5 Gestión del Cronograma	14
2.1.6 Protección de las Actividades	14
2.1.7 Diagrama de Gantt	15
2.1.8 Microsoft Project	15
2.1.9 Curva S.....	16
2.2 Marco Teórico.....	16
2.2.1 Método de Ruta Crítica (Critical Path Method).....	16
2.2.2 Método de Cadena Crítica (Critical Chain Project Management)	17
2.2.2.1 Tipos de Buffers.....	18

MÉTODO DE CADENA CRÍTICA Y MÉTODO DE RUTA CRÍTICA	4
2.2.2.2 Métodos para el cálculo de buffers	18
2.2.3 Fever Chart.....	21
3. Proyecto de Adecuación de Red Sanitaria en Bucaramanga	23
4. Metodología	33
4.1 Revisión Bibliográfica Método Cadena Crítica y Ruta Crítica	33
4.2 Aplicación de Secuencias y el Método de Ruta Crítica.....	34
4.3 Ejemplo de Aplicación de los Métodos para el Dimensionamiento de Buffers	35
5. Revisión de un Cronograma de Obra para un Proyecto de Adecuación que Aplique Herramientas Convencionales como la Técnica de Ruta Crítica.....	38
6. Aplicación y Comparación con el Método de Cadena Crítica utilizando Información de la Etapa de Seguimiento y Control	40
7. Evaluación del Estado Físico y Cumplimiento de Entregables del Proyecto de Adecuación para Determinar los Tiempos de Atraso y Adelanto de las Actividades Durante la Ejecución	43
8. Conclusiones	52
9. Recomendaciones.....	54
Referencias Bibliográficas	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Curva de Distribución de Probabilidades</i>	15
Figura 2. <i>Representación Gráfica Red Método de Ruta Crítica</i>	17
Figura 3. <i>Fever Chart</i>	21
Figura 4. <i>Actividades en las Zonas del Proyecto de Adecuación</i>	26
Figura 5. <i>Actividades en las Zonas del Proyecto de Adecuación</i>	26
Figura 6. <i>Actividades en las Zonas del Proyecto de Adecuación</i>	29
Figura 7. <i>Actividades en las zonas del proyecto de adecuación</i>	30
Figura 8. <i>Actividades en las zonas del proyecto de adecuación</i>	30
Figura 9. <i>Actividades en las zonas del proyecto de adecuación</i>	31
Figura 10. <i>Diagrama de Gantt</i>	36
Figura 11. <i>Diagrama de Gantt con Buffers</i>	37
Figura 12. <i>Diagrama de Gantt</i>	39
Figura 13. <i>Diagrama de Gantt del Proyecto</i>	44
Figura 14. <i>Diagrama de Gantt Método RSEM</i>	45
Figura 15. <i>Fever Chart – Método Cortar y Pegar</i>	48
Figura 16. <i>Fever Chart – Método Tercio Crítico</i>	48
Figura 17. <i>Fever Chart – Método Raíz Cuadrada de Suma de Cuadrados</i>	49
Figura 18. <i>Comparación Curvas S</i>	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Duración Real por Zonas.</i>	32
Tabla 2. <i>Características de los Métodos en Estudio.</i>	33
Tabla 3. <i>Duraciones con Protección por Zonas.</i>	34
Tabla 4. <i>Datos Ejemplo de Aplicación.</i>	35
Tabla 5. <i>Dimensionamiento de Buffers.</i>	36
Tabla 6. <i>Comparación Duraciones Totales.</i>	37
Tabla 7. <i>Duraciones sin Protección y con Protección del Proyecto Tipo.</i>	39
Tabla 8. <i>Duraciones sin Protección y con Protección por Zonas.</i>	40
Tabla 9. <i>Buffer de Proyecto y Duración Total.</i>	41
Tabla 10. <i>Buffers de Alimentación.</i>	41
Tabla 11. <i>Comparación Método de Ruta Crítica y Método de Cadena Crítica.</i>	42
Tabla 12. <i>Comparación Duraciones del Proyecto.</i>	45

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Cantidades, rendimientos y duraciones de las actividades del proyecto.

Apéndice B. Cronograma de obra por zonas - Duraciones con protección.

Apéndice B1. Cronograma de obra por zonas - Duraciones sin protección.

Apéndice C. Cronograma del ejemplo de aplicación.

Apéndice C1. Cronograma Método cortar y pegar – Ejemplo de aplicación.

Apéndice C2. Cronograma Método tercio crítico – Ejemplo de aplicación.

Apéndice C3. Cronograma Método raíz cuadrada de suma de cuadrados – Ejemplo de aplicación.

Apéndice D. Cálculo de buffers.

Apéndice D1. Cronograma Método cortar y pegar.

Apéndice D2. Cronograma Método tercio crítico.

Apéndice D3. Cronograma Método raíz cuadrada de suma de cuadrados.

Apéndice E. Cronograma de obra por zonas - Duraciones reales.

Apéndice F. Comparación de duraciones reales con los métodos CPM y CCPM.

Apéndice G. Gráficas fever chart del Método de Cadena Crítica.

Apéndice H. Gráficas Curva S.

Resumen

Título: Estudio Comparativo de Duraciones Entre el Método de Cadena Crítica y el Método de Ruta Crítica en un Proyecto de Adecuación. *

Autor: Luisa Fernanda Escobar Gómez**

Palabras Clave: Gestión de Proyectos, Método de Cadena Crítica (CCPM), Método de Ruta Crítica (CPM), Incertidumbre, Duraciones, Márgenes de Seguridad, Buffers.

Descripción

El método de cadena crítica (CCPM) es una de las alternativas utilizadas para realizar planificación y control de cronogramas durante la gestión de un proyecto, sin embargo, se diferencia de los métodos convencionales por el manejo de la incertidumbre, debido a que ubica los márgenes de seguridad, llamados buffers, en puntos clave a lo largo del cronograma de proyecto, logrando reducir las duraciones finales de las actividades, dando como resultado estimaciones más confiables y cercanas a la realidad. Por medio de las estimaciones obtenidas a partir de los métodos de ruta crítica y de cadena crítica y los tiempos reales de un proyecto de obra tipo adecuación en la ciudad de Bucaramanga, se realiza un estudio comparativo que analiza las diferencias de duraciones en las actividades ejecutadas y la proximidad entre estimaciones y duraciones reales, evidenciando las ventajas de las diferentes técnicas de cadena crítica y mostrando que su aplicación en proyectos de construcción tipo adecuación civil, donde la complejidad de ejecución es presentada, también son beneficiosas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil.
Director: Homer Armando Buelvas Moya. Magister en ingeniería estructural y evaluación y gestión de proyectos.

Abstract

Title: Comparative Study of Durations Between the Critical Chain Method and the Critical Path Method in an Adequacy Project*

Author: Luisa Fernanda Escobar Gómez**

Keywords: Project Management, Critical Chain Method (CCPM), Critical Path Method (CPM), Uncertainty, Durations, Safety Margins, Buffers.

Description

The critical chain method (CCPM) is one of the alternatives used for planning and controlling schedules during project management; however, it differs from conventional methods by providing another way of handling uncertainty. The CCPM place safety margins into the schedule, called buffers, at key points along the project schedule, thus reducing the final durations of activities and resulting in more reliable estimates. By means of the estimates obtained from the critical path and critical chain methods and the real times of a construction project in the city of Bucaramanga, a comparative study is carried out to analyze the differences in durations in the executed activities and the proximity between estimates and real durations, evidencing the advantages of the different critical chain techniques and showing that the application in civil construction projects is useful to solve the complexity of execution.

* Degree Work

**Faculty of Physical – Mechanical Engineering. Civil Engineering School. Civil Engineering. Director: Homer Armando Buelvas Moya. Master in structural engineering and project management.

Introducción

Los proyectos de construcción actualmente se caracterizan por el uso de altas tecnologías, maquinaria, materiales y demás servicios para garantizar la entrega de proyectos innovadores. El afán de alcanzar altos estándares en la ejecución conlleva a desestimar elementos de planeación, lo cual genera efectos negativos en las duraciones, ruta crítica y entrega pronta de bienes y servicios debido a que se le resta importancia al manejo adecuado de un plan de gestión (Modern management systems a construction industry cost effectiveness project report, Jun 1982).

En la etapa de planificación, se implementan herramientas y técnicas dentro del plan de gestión de un proyecto para identificar los paquetes de trabajo, estimar las duraciones adecuadas y costos reales para su ejecución. Durante la etapa de seguimiento y control, el proyecto puede verse afectado por retrasos, prórrogas, suspensiones y etapas de incertidumbre, por lo tanto, es necesario seguir haciendo uso de estas herramientas que tengan en cuenta las condiciones reales del proyecto sin desestimar variables adicionales aleatorias.

El Método de Cadena Crítica (CCPM) es un procedimiento analítico de gestión de proyectos basado en la búsqueda de aquellos mecanismos que permiten gestionar la incertidumbre de un proyecto reduciendo su duración para encontrar tiempos más ajustados a la realidad, con una mayor confianza en la fecha de terminación, un menos caos y una replanificación de los plazos (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

De igual forma, también permite gestionar los tiempos por medio de un monitoreo de las actividades para reducir las desviaciones y optimizar los recursos.

Mediante este proyecto de investigación se plantea realizar un estudio comparativo entre la aplicación del método de cadena crítica y el método de ruta crítica convencional en el cronograma de actividades de mantenimiento y adecuación de un proyecto urbano, aquellos que tienen una incidencia sobre una estructura construida y que la incertidumbre puede ser mayor al tener que intervenir espacios existentes y carentes de información.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un estudio comparativo de duraciones entre el método de cadena crítica y el método de ruta crítica en un proyecto de adecuación.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de la construcción de un cronograma de obra para un proyecto de adecuación que aplique herramientas convencionales como la técnica de ruta crítica.
- Aplicar el método de cadena crítica utilizando información de la etapa de seguimiento y control de un proyecto de adecuación para comparar las diferencias con respecto al método convencional de ruta crítica.
- Evaluar el estado físico y cumplimiento de los entregables de un proyecto de adecuación para determinar los tiempos de atraso y adelanto que tienen las actividades durante la ejecución.

2. Marco de Referencia

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Entregables

Un entregable es cualquier producto, resultado o capacidad única y verificable para ejecutar un servicio que se produce para completar un proceso, una fase o un proyecto. Por lo general, los entregables son los resultados del proyecto y pueden incluir componentes del plan para la dirección del proyecto (Project Management Institute, 2017).

2.1.2 Fase de Planificación

Según Valderrama y Mattos (2014) en el libro “Métodos de planificación y control de obras: Del diagrama de barras al BIM”, la planificación incluye los procesos requeridos para administrar la finalización del proyecto a tiempo y se centra en la definición de las actividades, su secuenciación y duración (Valderrama & Mattos, 2014).

2.1.3 Fase de Ejecución

De acuerdo con el Project Management Institute (PMI) y su Guía PMBOK, los procesos realizados para completar el trabajo definido en el plan de dirección de proyecto a fin de satisfacer los requisitos del proyecto (Project Management Institute, 2017).

2.1.4 Fase de Monitoreo y Control

El PMI en su Guía PMBOK señala que la fase de monitoreo y control son los procesos requeridos para hacer seguimiento, analizar y regular el progreso y desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes (Project Management Institute, 2017).

2.1.5 Gestión del Cronograma

Según el PMBOK, la programación del proyecto proporciona un plan detallado que representa el modo y el momento en el que el proyecto entregará los productos, servicios y resultados definidos en el alcance del proyecto y sirve como herramienta para la comunicación, la gestión de las expectativas de los interesados y como base para informar el desempeño.

La gestión del cronograma del proyecto incluye los procesos requeridos para administrar la finalización del proyecto a tiempo, cómo planificar la gestión del cronograma, definir, secuenciar y estimar la duración de las actividades, y desarrollar y controlar el cronograma (Project Management Institute, 2017).

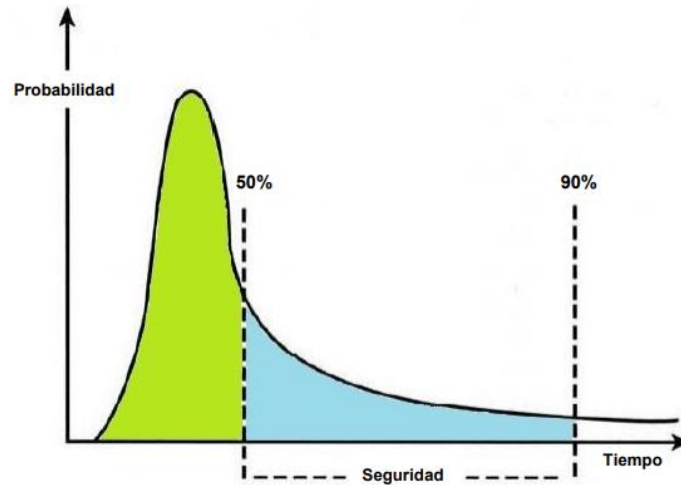
2.1.6 Protección de las Actividades

A la hora de planificar un proyecto es indispensable estimar el tiempo de duración de las diferentes tareas y definir la fecha prevista de su conclusión.

El ser humano tiende a basar estas estimaciones en experiencias anteriores y en el deseo de protegerse de la incertidumbre ante posibles imprevistos que puedan surgir. Por esta razón, se evita las evaluaciones de duración probable de un 50% acogiéndose a probabilidades de realización de la actividad de un 90% para cada una de las tareas del proyecto, como se observa en la gráfica de la Figura 1 (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2015). Los tiempos mayores tienen en cuenta en su duración, el margen de seguridad como método de prevención ante posibles imprevistos.

Figura 1.

Curva de Distribución de Probabilidades.



Nota: (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2015)

Esta diferencia de tiempo es denominada en la terminología de la Cadena Crítica como “protección” y corresponde al colchón de seguridad que el trabajador considera necesario en caso de que surja algún problema en la ejecución de dicha actividad (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2015).

2.1.7 Diagrama de Gantt

Diagrama de barras con información del cronograma, donde las actividades se enumeran en el eje vertical, las fechas se muestran en el eje horizontal y las duraciones de las actividades se muestran como barras horizontales colocadas según las fechas de inicio y finalización (Project Management Institute, 2017).

2.1.8 Microsoft Project

Es la herramienta por excelencia para la gestión de proyectos empresariales, es una aplicación de software de pago que funciona bajo Windows. Administradores y jefes de proyecto emplean Microsoft Project para planificar y controlar el desarrollo de un proyecto, la organización

adecuada y eficaz de las tareas, con el fin de evitar retrasos y mantenerse dentro del presupuesto asignado (Barrios, 2020).

2.1.9 Curva S

La curva S de un proyecto es un resultado del cronograma que se obtiene al planificar y puede aplicarse al consumo de cualquier recurso, pues representa un avance físico o monetario (Valderrama & Mattos, 2014).

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Método de Ruta Crítica (*Critical Path Method*)

El método de la ruta crítica es una técnica de estimación de tiempos de un proyecto que se utiliza para estimar la mínima duración del proyecto y determinar el nivel de flexibilidad en la programación de los caminos de red lógicos dentro del modelo de programación. Esta técnica de análisis de la red del cronograma calcula las fechas de inicio y finalización, tempranas y tardías, para todas las actividades, sin tener en cuenta las limitaciones de recursos, y realiza un análisis que recorre hacia adelante y hacia atrás toda la red del cronograma (Project Management Institute, 2017).

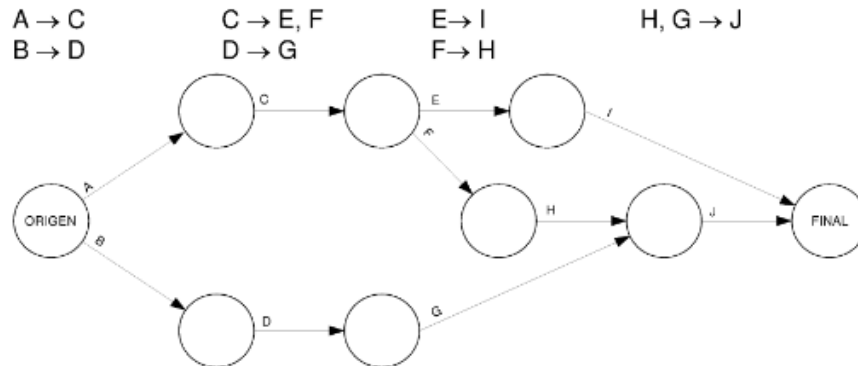
Las técnicas del CPM se apoyan sobre un instrumento gráfico, del tipo de los grafos orientados en el que se representa la programación de la ejecución de la obra del proyecto que se estudia, fue desarrollado en principio para la industria y se aplica a la planificación, programación y control de las obras de edificación.

Por medio de flechas o arcos se representan las actividades u operaciones en que se descompone el proyecto. Por medio de círculos, que son los nudos o vértices del grafo, se representan los sucesos o momentos puntuales en el proceso de ejecución del proyecto. Las flechas que llegan a un nudo representan las actividades que han de terminar previamente para que puedan

comenzar las actividades representadas por las flechas que parten del nudo. Hay nudos notables en toda la red, el nudo origen (sólo parten flechas) y el nudo final (sólo llegan flechas) (Garabito López & Garabito Gregorio, 2011). Tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Representación Gráfica Red Método de Ruta Crítica.



Nota: (Garabito López & Garabito Gregorio, 2011)

2.2.2 Método de Cadena Crítica (*Critical Chain Project Management*)

El método de la cadena crítica (CCPM) es un procedimiento analítico de gestión de proyectos basado en la búsqueda de aquellos mecanismos que permiten gestionar la incertidumbre de un proyecto reduciendo su duración, con una mayor confianza en la fecha de terminación, un menor caos y una replanificación de los plazos.

Esta metodología, definida por Goldratt en 1997, establece que las tareas deben ser despojadas de su protección individual para concentrar esta seguridad en determinados puntos clave del proyecto, considerándose la determinación de la longitud de los amortiguadores como uno de los principales desafíos de la utilización del CCPM (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

Este método permite al equipo de trabajo colocar amortiguadores o buffers en cualquier ruta del cronograma del proyecto para tener en cuenta los recursos limitados y las incertidumbres

de lo que se ejecutará (Barrios, 2020).. Estos buffers son las holguras de tiempo del proyecto que permiten la resolución de imprevistos sin afectar la fecha de finalización de este.

2.2.2.1 Tipos de Buffers

Buffer de proyecto (BP): Se ubica inmediatamente después de la última tarea del proyecto. Su objetivo es proteger el plazo del proyecto frente a las desviaciones que puedan producirse en actividades pertenecientes a la cadena crítica.

Buffer de alimentación (BA): Tiene dos posibles ubicaciones, inmediatamente antes de cada tarea del camino crítico que vaya precedida de alguna tarea no crítica o al final de un camino no crítico. Su objetivo es proteger a la cadena crítica ante posibles desviaciones de actividades no críticas.

Buffer de recurso (BR): Afecta a aquellas actividades de la cadena crítica, pues se trata de una reserva de capacidad de las mismas para garantizar que el recurso estará disponible cuando la cadena crítica lo requiera (Apaolaza Pérez De Eulate & Zubillaga, 2005).

2.2.2.2 Métodos para el cálculo de buffers

Método Cortar y Pegar (CP)

También conocido como la Ley del 50% y defendido por Goldratt en su libro Critical Chain (Goldratt, 1997).

Esta técnica permite definir el dimensionamiento de los amortiguadores mediante cuatro etapas:

1. Estimar el tiempo de duración de la cadena o subcadenas.
2. Separar los tiempos de protección de las actividades.
3. Colocar los tiempos de protección al final de la cadena.
4. Reducir al 50% la longitud de la suma de dichos tiempos.

Como norma general, para la aplicación de la técnica de Cortar y Pegar, es conveniente seguir una serie de recomendaciones:

- Ninguna actividad puede tener una longitud superior al 20% de la cadena crítica.
- La duración total asignada a los buffers no debe ser inferior al 25% del tamaño de la cadena crítica (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

Fórmula de cálculo:

$$Buffer = 0,5 \sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i) \text{ [Ecuación 1]}$$

Donde:

n : Número de actividades pertenecientes a la cadena crítica o a las subcadenas.

i : Actividad.

dcP_i : Duración de la actividad i con protección.

dsP_i : Duración de la actividad i sin protección.

Método Tercio Crítico (TC)

Es una variación simplista de la Ley del 50%, cuya principal ventaja es la omisión de la duración de las protecciones de las tareas.

Este proceso se basa en los siguientes cuatro pasos:

1. Estimar el tiempo de duración de la cadena o subcadenas.
2. Eliminar los tiempos de protección de las actividades.
3. Calcular la longitud de la cadena crítica o subcadenas.
4. Colocar un tercio de la longitud obtenida como buffer de proyecto o de alimentación

(Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

Fórmula de cálculo:

$$Buffer = (\sum_{i=1}^n dsP_i)/3 \text{ [Ecuación 2]}$$

Donde:

n : Número de actividades pertenecientes a la cadena crítica o a las subcadenas.

i : Actividad.

dsP_i : Duración de la actividad i sin protección.

Método Raíz Cuadrada de Suma de Cuadrados (RSEM)

Una de las alternativas más elaboradas es el Root Square Error Method (RSEM). En lugar de utilizar una regla empírica simple para el cálculo del tamaño de los buffers, este procedimiento tiene en cuenta la variación (σ) conocida en la duración de las actividades, teniendo en cuenta que la duración de la actividad con protección menos la duración de la actividad sin protección es aproximadamente dos veces la desviación (2σ), por aplicación del Teorema Central del Límite.

Este procedimiento propone calcular la duración de los buffers como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los márgenes de seguridad de todas las actividades (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

Fórmula de cálculo:

$$Buffer = \sqrt{\sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i)^2} \text{ [Ecuación 3]}$$

Donde:

n : Número de actividades pertenecientes a la cadena crítica o a las subcadenas.

i : Actividad.

dcP_i : Duración de la actividad i con protección.

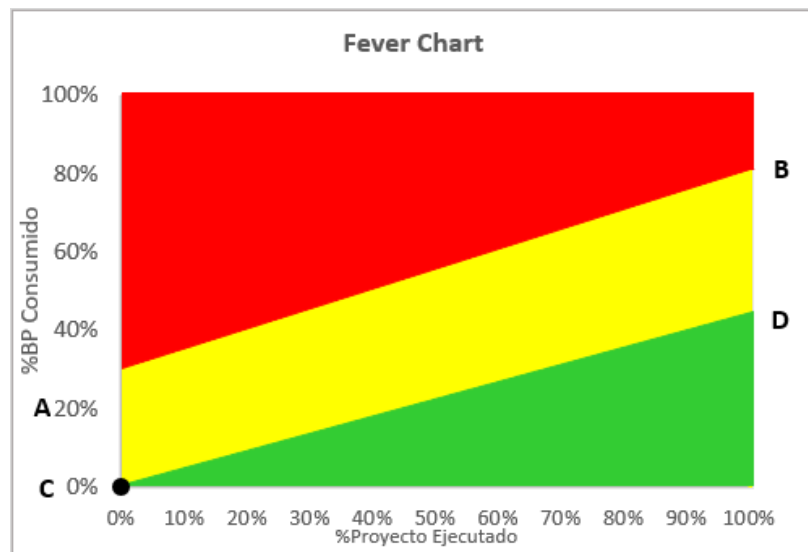
dsP_i : Duración de la actividad i sin protección.

2.2.3 Fever Chart

Las hojas de control denominadas Fever Chart, tal como se muestra en la Figura 3, son empleadas durante la etapa de seguimiento y gestión de los proyectos ejecutados bajo los términos de la CCPM, facilitando la lectura del estado de los proyectos y centrando los esfuerzos en gestionar únicamente los amortiguadores previamente dimensionados.

Figura 3.

Fever Chart.



Nota: (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017), (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2015) y (Newbold., 2011)

Dentro de estas tablas, la dimensión horizontal representa el grado de desempeño del proyecto, definiendo de izquierda a derecha el avance del mismo (del 0% al 100% respectivamente) y el eje vertical corresponde al porcentaje de buffer de proyecto que se ha consumido, entendiendo la línea superior como la ausencia de amortiguador (100% utilizado).

Las diferentes regiones serán definidas según el tipo de seguimiento y atención que se desee realizar sobre el proyecto, de forma que según la zona en la que se encuentre el punto de

control (zonas roja, amarilla o verde) se tome la acción más adecuada (medidas de rescate, proactivas o de atención, respectivamente) (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

Dentro de las Fever chart, existen cuatro puntos que son precisos definir con el objetivo de delimitar las regiones de control:

- Punto A y B: La unión de ambos puntos delimita el inicio y final del área amarillo/rojo.

Son las marcas más importantes ya que la zona roja implica la necesidad de actuación sobre la programación del proyecto.

‘A’ debe estar lo suficientemente por encima del punto 0% para dar cabida a los retrasos razonables de puesta en marcha de la obra, sin ser tan elevados que los problemas ocasionados en el inicio carezcan de vigilancia.

‘B’ debe estar lo suficientemente por debajo del punto 100% para permitir una oportunidad sensata para concluir el proyecto en tiempo.

- Punto C y D: La línea generada entre los puntos C y D definen el inicio y el final del área amarillo / verde. Desde el punto de vista del seguimiento del proyecto, es necesario conocer esta región amarilla, ya que cuando se encuentre sobre esta zona se debe activar nuestra atención sobre el proyecto.

‘C’ estará generalmente sobre el origen, ya que cualquier demora de inicio debería provocar cierta preocupación.

‘D’ es la señal más difícil de fijar y su colocación dependerá de qué tipo de atención y acciones se desean tomar en la región amarilla.

El control basado en este tipo de tablas potencia que el equipo de proyecto enfoque sus esfuerzos en los casos que exista un peligro real de no terminar a tiempo, evitando reaccionar ante

falsas alarmas ocasionadas por pequeñas variaciones en las estimaciones del calendario (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2015).

3. Proyecto de Adecuación de Red Sanitaria en Bucaramanga

El proyecto de construcción urbana a evaluar es un proyecto de mantenimiento y mejoramiento de la red sanitaria y sectores de agua lluvia en una plaza de mercado en la ciudad de Bucaramanga. Se llevó a cabo un seguimiento por parte de la estudiante, donde se vieron reflejadas las duraciones de actividades para realizar el respectivo análisis de los métodos en estudio.

Debido a que las labores habituales de la plaza de mercado no podían parar en su totalidad, las actividades del proyecto se tuvieron que ejecutar por zonas para evitar afectaciones negativas a la comunidad en su lugar de trabajo. Las zonas en las que se ejecutó el proyecto y sus actividades más relevantes son:

Zona 1

Pasillo de venta de pollo y carne. En esta zona se realizaron cambios de tuberías y puntos sanitarios, reconstrucción de muros y placas de piso e instalación de rejillas.

Entre las actividades ejecutadas se encuentran:

- Localización y replanteo manual.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Demolición de enchape cerámico y friso.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material proveniente de excavaciones, compactación mecánica con apisonador.

- Instalación de malla electrosoldada.
- Piso en concreto 3000 psi.
- Construcción muro en mampostería H-7.
- Instalación red sanitaria PVC diámetros 2", 3", 4" y puntos sanitarios.
- Instalación rejilla en aluminio 3x2".
- Regata en muro y enchapes de pared cerámicos.

Zona 2

Pasillo de venta de pescado, pollo y carne. Se hicieron reemplazos de tuberías existentes y puntos sanitarios, reconstrucción de muros, placas de piso, una columna y una viga, e instalación de reja metálica.

- Localización y replanteo manual.
- Desmonte de reja metálica.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Demolición de enchape cerámico, friso y muros.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material seleccionado de préstamo, compactación mecánica con apisonador.
- Base granular compactación mecánica con rodillo vibrante tándem 1m.
- Instalación de malla electrosoldada y acero de refuerzo figurado.
- Placa de antepiso, piso, rampa, columna y viga en concreto 3000 psi.
- Construcción muro en mampostería H-7.
- Instalación red sanitaria PVC diámetros 2", 3", 4" y puntos sanitarios.
- Instalación rejilla en aluminio 3x2" y 6x4".

- Regata en muro y enchapes de pared cerámicos.
- Instalación reja metálica existente.

Zona 3

Cocinas y restaurante. Se hizo desmonte y reemplazo de tuberías sanitarias, demolición y reconstrucción de caja de inspección, cambio de enchapes y reconstrucción de placas de piso.

- Localización y replanteo manual.
- Desmonte de tubería sanitaria.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Demolición de enchape cerámico, friso, muros y caja de inspección.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material proveniente de excavaciones, compactación mecánica con apisonador.
- Instalación de malla electrosoldada.
- Placa de antepiso, piso, rampa en concreto 3000 psi.
- Instalación red sanitaria PVC diámetros 2", 3", 4".
- Construcción caja de inspección 0.6x0.6.
- Instalación rejilla en aluminio 3x2" y 6x4".
- Regata en muro y enchapes de pared cerámicos.

Figura 4.

Actividades en las Zonas del Proyecto de Adecuación.

**Figura 5.**

Actividades en las Zonas del Proyecto de Adecuación.

**Zona 4**

Pasillo de verduras y frutas. Se realizó desmonte de reja metálica, demolición, reconstrucción y limpieza y adecuación de cajas de inspección, e instalación de tubería PVC de

pared estructural.

- Localización y replanteo manual.
- Desmonte de reja metálica.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Demolición de caja de inspección.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material seleccionado de préstamo, compactación mecánica con

apisonador.

- Instalación de malla electrosoldada.
- Piso, rampa y anden en concreto 3000 psi.
- Instalación tubería PVC de pared estructural alcantarillado hermético.
- Limpieza y adecuación de cajas existentes.
- Construcción cajas de inspección 0.6x0.6 y 0.8x0.8.

Zona 5

Zona de trampa de grasas y cajas. Se realizaron reemplazos de tuberías sanitarias y puntos sanitarios, instalación de trampa de grasas, estructura de retención de sólidos, y construcción de cajas de inspección.

- Localización y replanteo manual.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material proveniente de excavaciones, compactación mecánica con

apisonador.

- Instalación de malla electrosoldada.

- Piso en concreto 3000 psi.
- Instalación red sanitaria PVC diámetros 3", 4" y punto de ventilación.
- Instalación de trampa de grasas tipo ovoide y estructura de retención de sólidos.
- Construcción cajas de inspección 0.6x0.6 y 0.8x0.8.

Zona 6

Parqueadero. Se hizo desmonte y cancelación de puntos sanitarios, instalación de tubería PVC de pared estructural, y limpieza y adecuación de cajas existentes.

- Localización y replanteo manual.
- Desmonte de tubería sanitaria.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material proveniente de excavaciones, compactación mecánica con apisonador.
- Instalación de malla electrosoldada.
- Piso y rampa en concreto 3000 psi.
- Instalación red sanitaria PVC diámetros 3" y cancelación de puntos de tubería sanitaria 3", 4".
- Instalación de tubería PVC de pared estructural alcantarillado hermético.
- Limpieza y adecuación de cajas existentes.
- Construcción caja de inspección 0.6x0.6.

Figura 6.

Actividades en las Zonas del Proyecto de Adecuación

**Zona 7**

Zona de rampa y espacio público. Se realizó instalación de tubería de PVC de pared estructural, limpieza de cajas existentes, reemplazo e instalación de piso adoquín, bordillos y andén.

- Localización y replanteo manual.
- Corte y demolición de piso y antepiso con martillo eléctrico y cortadora de concreto.
- Demolición placa de piso y sardineles con compresor diésel y martillo.
- Excavación manual en material común en seco.
- Relleno con material seleccionado de préstamo, compactación mecánica con apisonador.
- Base granular compactación mecánica con rodillo vibrante tándem 1m.
- Andén y bordillo recto en concreto 3000 psi.
- Instalación de tubería PVC de pared estructural alcantarillado hermético.
- Limpieza y adecuación de cajas existentes.

- Construcción caja de inspección 0.6x0.6.
- Instalación piso adoquín.

Figura 7.

Actividades en las zonas del proyecto de adecuación.



Figura 8.

Actividades en las zonas del proyecto de adecuación.



Zona 8

Fachada. Se realizó demolición y reconstrucción del enchape.

- Demolición mortero de pega enchape fachada.
- Friso y enchape para fachada.

Zona 9

Cubierta. Se realizó desmonte del canal metálico, del flanche existente, reinstalación de teja termoacústica, instalación de canal lámina galvanizada y tubería de PVC de pared estructural.

- Localización y replanteo manual.
- Desmonte de canal metálico y flanche existente.
- Instalación de tubería PVC de pared estructural alcantarillado hermético.
- Instalación canal lámina galvanizada.
- Destapado de bajantes de agua lluvia.
- Suministro e instalación de cinta flanche y teja cubierta tipo metálica galvanizada.

Figura 9.

Actividades en las zonas del proyecto de adecuación.



El proyecto tuvo una duración total de 64 días. En la Tabla 1 se muestran las duraciones de cada zona. Cabe resaltar que, la duración de las zonas es la suma de las duraciones individuales de los paquetes de actividades que las conforman.

Tabla 1.

Duración Real por Zonas.

Zona	Duración real [días]
Zona 1	9
Zona 2	30
Zona 3	16
Zona 4	18
Zona 5	18
Zona 6	11
Zona 7	18
Zona 8	13
Zona 9	11

La obra en ejecución tuvo ciertas variables que no fueron idealizadas por el formulador original del proyecto. No existían planos As built del lugar, lo cual generaba mayor incertidumbre en la ejecución de las actividades, estaban sujetos a cambios repentinos debido a los imprevistos ocasionados a medida que avanzaba el proyecto, la presencia de la comunidad en el lugar de trabajo hizo imposible ejecutar las actividades en un orden lógico, así mismo, en varias ocasiones y a petición de ellos, se tuvieron que parar las labores, generando retrasos al contratista y afectando las fechas establecidas de entrega del proyecto.

4. Metodología

4.1 Revisión Bibliográfica Método Cadena Crítica y Ruta Crítica

Se procede a realizar una búsqueda de información relacionada con el método de cadena crítica y ruta crítica en el área de gestión de proyectos. Se identifican sus características, las semejanzas y diferencias entre ellos, y se realiza un filtro de información relevante que se sintetiza en la Tabla 2.

Tabla 2.

Características de los Métodos en Estudio.

Ruta Crítica (CPM)	Cadena Crítica (CCPM)
Protege la fecha fin del proyecto con márgenes de seguridad en cada actividad y por las holguras de los caminos no críticos.	Protege la fecha fin del proyecto por medio de buffers en la cadena crítica y en las subcadenas.
Se centra en terminar las actividades en la fecha prevista de fin del proyecto.	Se centra en el progreso de las actividades de la cadena crítica.
No considera esta relación.	La cadena crítica se define a partir de la dependencia entre actividades y recursos. Insertando buffers de recurso para asegurar la disponibilidad de este cuando se requiera.
Tiende a sobrecargar el sistema con diferentes proyectos.	Por medio de la capacidad de recurso, limita los proyectos que puede soportar el sistema.

Ruta Crítica (CPM)	Cadena Crítica (CCPM)
Determina qué tan críticas son las actividades para asignarles un margen de seguridad individual.	Agrupar los márgenes de seguridad de las actividades en un buffer de proyecto para las actividades de la cadena crítica, y buffer de alimentación para las actividades de las subcadenas.

Nota: (González-Cruz, Asensio-Cuesta, Diego-Más, & Alcaide-Marzal, 2009.)

4.2 Aplicación de Secuencias y el Método de Ruta Crítica

Para determinar las duraciones en los cronogramas de obra, el método de ruta crítica hace uso de márgenes de seguridad individuales en las duraciones de cada actividad. Por lo tanto, para la obtención de tales duraciones del proyecto en estudio, se tuvieron en cuenta las cantidades pertenecientes a cada actividad y los rendimientos propuestos, los cuales fueron obtenidos por medio de juicio de expertos, un maestro de obra y tres ingenieros. Con los valores correspondientes para cada actividad, se realizó el cálculo de las duraciones, dividiendo las cantidades sobre los rendimientos. [Ver Apéndice A]

En primera instancia se ordenaron las actividades y se pudieron obtener las duraciones de cada zona y de la totalidad del proyecto, que para este caso es de 78 días. Tales duraciones son también llamadas duraciones con protección. [Ver Apéndice B] y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Duraciones con Protección por Zonas.

Zona	dcP [días]
Zona 1	14
Zona 2	29
Zona 3	23
Zona 4	26

Zona	dcP [días]
Zona 5	21
Zona 6	17
Zona 7	16
Zona 8	14
Zona 9	17

4.3 Ejemplo de Aplicación de los Métodos para el Dimensionamiento de Buffers

Para entender con mayor claridad la importancia, el uso de los tipos de buffers en un proyecto, su dimensionamiento y las diferencias entre métodos, se tomó como ejemplo el caso práctico evidenciado en (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017), el cual muestra las duraciones sin protección y con protección de un proyecto tipo, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

Datos Ejemplo de Aplicación.

Actividad	Predecesora	dsP	dcP
1		4	6
2	1	4	7
3	2	3	5
4	3;6	5	6
5		4	5
6	5	2	3

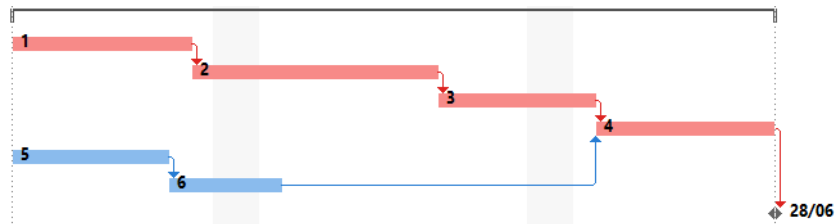
Nota: (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017)

Teniendo en cuenta los datos suministrados, se procede a realizar el diagrama de Gantt para ver de manera organizada las actividades y determinar la ruta crítica del proyecto. En la Figura 10 se muestran las seis actividades ubicadas de acuerdo con la Tabla 4, numeradas en la parte izquierda del recuadro, y el fin del proyecto. Se encuentra señalada en rojo la ruta crítica o cadena

crítica (actividades 1,2,3,4), debido a que es la ruta que se tarda más en finalizar y la subcadena en color azul, que consta de las actividades 5 y 6.

Figura 10.

Diagrama de Gantt



Nota: [Apéndice C]

Para continuar con el método de cadena crítica, es necesario dimensionar los buffers de alimentación y el buffer de proyecto. Por lo que se realiza este dimensionamiento utilizando los tres métodos: cortar y pegar, tercio crítico y raíz cuadrada de suma de cuadrados, con las ecuaciones 1, 2 y 3. Se sintetiza la información en la Tabla 5.

Tabla 5.

Dimensionamiento de Buffers.

	BP [días]	BA [días]
Método cortar y pegar	4	1
Método tercio crítico	5,33	2
Método raíz cuadrada de suma de cuadrados	4,24	1,41

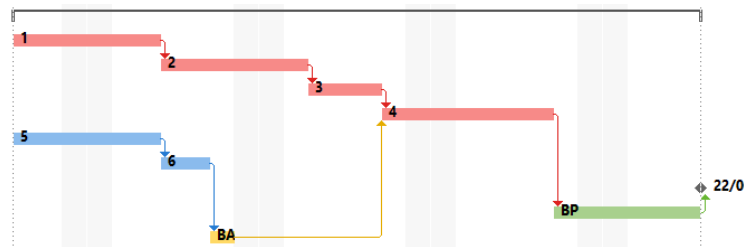
Para facilitar el cálculo de las nuevas duraciones del proyecto, se redondean los valores al entero mayor.

En los Apéndices C1, C2 y C3 se encuentran los nuevos diagramas de Gantt, en los cuales, a los datos de duraciones sin protección se le añaden los valores obtenidos para cada buffer al utilizar los tres métodos de cálculo. En la Figura 11 se muestra cómo queda el cronograma

actualizado con los buffers, en color amarillo se muestra el buffer de alimentación agregado a la subcadena y en color verde, el buffer de proyecto agregado a la cadena crítica.

Figura 11.

Diagrama de Gantt con Buffers



[Apéndice C1]

En el ejemplo de (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017) se muestra la duración real del proyecto tipo y se realiza una comparación con los resultados de las duraciones obtenidas a partir de los métodos, como se especifica en la Tabla 6.

Tabla 6.

Comparación Duraciones Totales.

	Duración total [días]
Estimación inicial	24
Proyecto real	19
Método cortar y pegar	20
Método tercio crítico	22
Método raíz cuadrada de suma de cuadrados	21

Nota: (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017)

Teniendo en cuenta que el proyecto finalizó en 19 días, se puede deducir lo siguiente:

- Finalizó 5 días antes que la duración de la estimación inicial.
- Finalizó 1 día antes que la duración por el método cortar y pegar.
- Finalizó 2 días antes de lo previsto en el método de tercio crítico.

- Finalizó 3 días antes de lo esperado en el método de raíz cuadrada de suma de cuadrados.

Por lo tanto, la estimación de duraciones por medio de las técnicas del método de cadena crítica demuestra una reducción en la duración al compararlo con el método convencional de ruta crítica y se acerca más a las duraciones reales.

5. Revisión de un Cronograma de Obra para un Proyecto de Adecuación que Aplique Herramientas Convencionales como la Técnica de Ruta Crítica

El proyecto tipo elegido como caso de estudio, aplica el método de ruta crítica en su cronograma de obra y proporciona información pertinente para realizar posteriormente la comparación entre el método mencionado y el método de cadena crítica. Por medio de visitas técnicas se revisa el cronograma de obra, se identifican las actividades a realizar, las duraciones estimadas, los rendimientos propuestos y los entregables. Las 9 zonas que van a ser intervenidas en el proceso de mantenimiento y adecuación ya tienen definidas sus duraciones con protección, obtenidas por medio de la información otorgada por el ingeniero residente de obra.

Para hacer el análisis por medio del método de cadena crítica, es necesario tener las duraciones sin protección de las actividades, por lo que es pertinente recurrir a algunas bases de datos que provee la Biblioteca Virtual de la UIS, como Construdata (Construdata, 2022) y el INVIAS (2022), de tal forma que se puedan obtener los rendimientos a partir de estas bases de datos y posteriormente realizar el cálculo de las duraciones.

Con la información recopilada de las duraciones en el Apéndice A, se realizan los cronogramas de obra para cada caso de tal forma que se puedan observar de manera clara las

duraciones de cada zona y de la totalidad del proyecto, la ruta crítica y las subcadenas. Fue posible evidenciar que la ruta crítica consta de tres zonas, la zona 3, 2 y 4, y hay 6 subcadenas, que son cada una de las zonas restantes, como se muestra en la Figura 12. [Apéndice B y Apéndice B1].

En la Tabla 7 se muestran las duraciones totales del proyecto tipo para tiempos sin protección y tiempos con protección. Y en la Tabla 8 se muestran las duraciones de cada zona para los dos casos.

Figura 12.

Diagrama de Gantt.

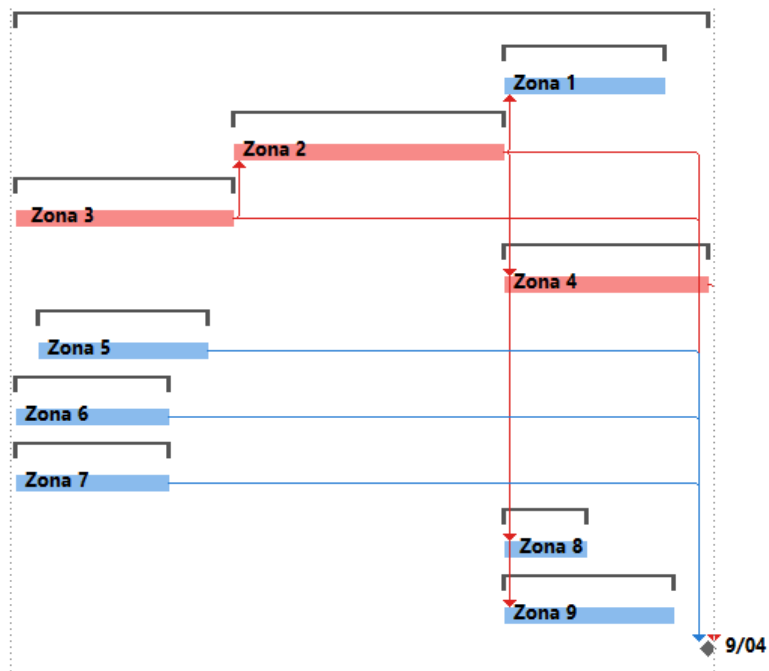


Tabla 7.

Duraciones sin Protección y con Protección del Proyecto Tipo.

Proyecto tipo	
dsP total [días]	49
dcP total [días]	78

Tabla 8.*Duraciones sin Protección y con Protección por Zonas.*

Zona	dsP [días]	dcP [días]
Zona 1	11	14
Zona 2	18	29
Zona 3	16	23
Zona 4	15	26
Zona 5	12	21
Zona 6	11	17
Zona 7	11	16
Zona 8	6	14
Zona 9	12	17

6. Aplicación y Comparación con el Método de Cadena Crítica utilizando Información de la Etapa de Seguimiento y Control

Teniendo en cuenta las duraciones sin y con protección de la cadena crítica, de las subcadenas y de sus respectivas actividades es posible realizar el cálculo del buffer de proyecto y los buffers de alimentación por medio de las ecuaciones establecidas para cada método (cortar y pegar, tercio crítico y raíz cuadrada de suma de cuadrados). [Ver Apéndice D]

A las duraciones sin protección de la cadena crítica y las subcadenas, se les suman los buffers correspondientes para obtener las duraciones estimadas del método de cadena crítica. Y se realizan sus respectivos diagramas de Gantt. [Apéndice D1, D2, D3]

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos del cálculo del buffer de proyecto para cada método y la duración total del proyecto tipo, por medio de la suma de la duración sin protección y el buffer de proyecto.

Tabla 9.

Buffer de Proyecto y Duración Total.

	Buffer de Proyecto [días]	Duración [días]
Método CYP	15,0	64,0
Método TC	17,0	66,0
Método RSEM	18,0	67,0

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos del buffer de alimentación para cada subcadena y las nuevas duraciones de cada una, que son la suma de la duración sin protección y el buffer de alimentación.

Tabla 10.

Buffers de Alimentación.

Subcadena	Método	BA [días]	Duración [días]
SC 1 –	CYP	2,0	13,0
Zona 1	TC	4,0	15,0
	RSEM	3,0	14,0
SC2 –	CYP	5,0	17,0
Zona 5	TC	4,0	16,0
	RSEM	9,0	21,0
SC3 –	CYP	3,0	14,0
Zona 6	TC	4,0	15,0
	RSEM	6,0	17,0

Subcadena	Método	BA [días]	Duración [días]
SC4 –	CYP	3,0	14,0
Zona 7	TC	4,0	15,0
	RSEM	5,0	16,0
SC5 –	CYP	4,0	10,0
Zona 8	TC	2,0	8,0
	RSEM	8,0	14,0
SC6 –	CYP	3,0	15,0
Zona 9	TC	4,0	16,0
	RSEM	5,0	17,0

Con la duración con protección obtenida a partir del método de ruta crítica convencional y las nuevas duraciones teniendo en cuenta los buffers de proyecto calculados, es posible realizar una comparación entre ellas, tal como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11.

Comparación Método de Ruta Crítica y Método de Cadena Crítica.

Cronograma	Duración [días]	Reducción de tiempos [días]	Reducción de tiempos [%]
Método CPM	78,0	-	-
Método CYP	64,0	14,0	17,9%
Método TC	66,0	12,0	15,4%
Método RSEM	67,0	11,0	14,1%

Nota: [Apéndice F]

El método de cadena crítica presenta una evidente disminución en los tiempos estimados a comparación de la duración del método de ruta crítica.

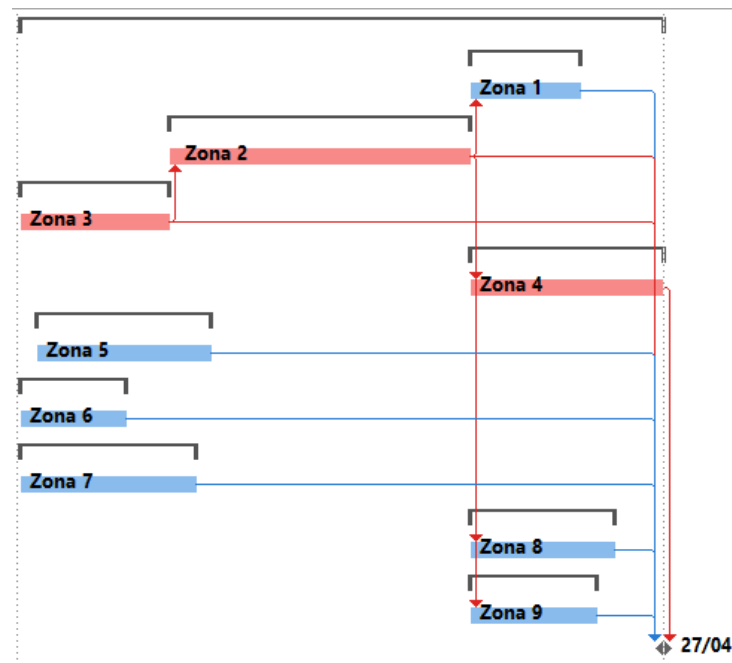
- El método cortar y pegar tiene una reducción de 14 días, es decir un 17,9% menos que lo estimado con el método ruta crítica. Es el método que presenta mayor reducción al realizar la

comparación.

- El método tercio crítico presenta una reducción de 12 días, un 15,4% menos que la estimación del cronograma original.
- El método de raíz cuadrada de suma de cuadrados tiene la menor reducción de tiempos al compararlo con los demás métodos, tiene 11 días de diferencia (14,1%) con respecto al método de ruta crítica.

7. Evaluación del Estado Físico y Cumplimiento de Entregables del Proyecto de Adecuación para Determinar los Tiempos de Atraso y Adelanto de las Actividades Durante la Ejecución

Durante los meses de ejecución de la obra, se realizó un seguimiento de las actividades a medida que avanzaba el proyecto, con esa información, se determinaron las duraciones de cada zona y la duración total al concluir el proyecto. Para llevar mejor registro y monitoreo de lo ejecutado, se realizó el cronograma real del proyecto. Se señala la ruta crítica en rojo y las subcadenas en color azul, Figura 13. [Apéndice E]

Figura 13.*Diagrama de Gantt del Proyecto*

Con los resultados obtenidos a partir de los métodos de cadena crítica, los datos de la estimación por ruta crítica, y la duración real del proyecto (64 días), fue posible realizar un análisis de la diferencia entre las duraciones del proyecto, así cómo se realizó en el ejemplo desarrollado en (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017).

- Finalizó 14 días antes que lo estimado en el método de ruta crítica convencional.
- Finalizó en el mismo tiempo que la duración por el método cortar y pegar.
- Finalizó 2 días antes de lo estimado en el método de tercio crítico.
- Finalizó 3 días antes de lo previsto en el método de raíz cuadrada de suma de cuadrados.
- En todos los métodos de cadena crítica se consumieron 15 días del buffer de proyecto para cada caso.

El método de cadena crítica estimó duraciones más acordes a la fecha de finalización real. Es decir, la asignación de márgenes de seguridad globales por medio de buffers genera mayor probabilidad de finalización en las fechas estimadas que el método de ruta crítica. Se puede evidenciar esta información en la Tabla 12.

Tabla 12.

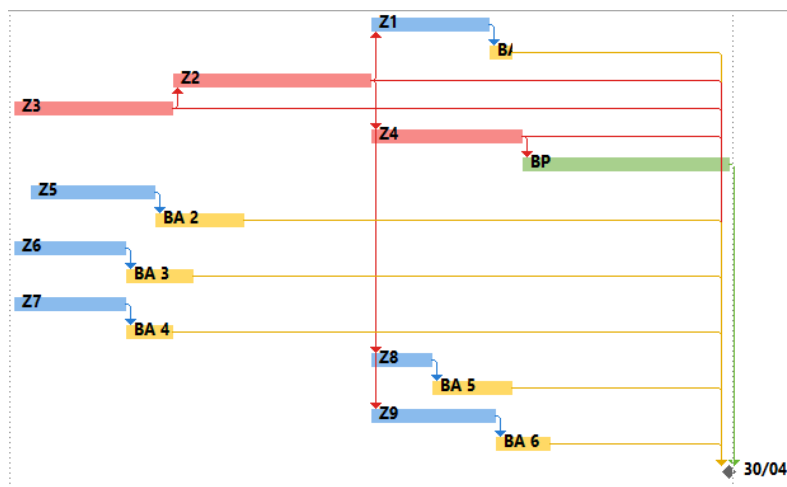
Comparación Duraciones del Proyecto.

Cronograma	Duración [días]	Diferencia de tiempos [días]
Real	64,0	-
Método CPM	78,0	+14
Método CYP	64,0	0
Método TC	66,0	+2
Método RSEM	67,0	+3

Nota: [Apéndice F]

Figura 14.

Diagrama de Gantt Método RSEM.



Nota: [Apéndice D3]

La Figura 14 muestra el diagrama de Gantt del método raíz cuadrada de suma de cuadrados con sus respectivos buffers, los recuadros amarillos son los buffers de alimentación y el verde el buffer de proyecto.

Comparando las duraciones obtenidas con los buffers de alimentación para las seis subcadenas y la duración real de cada una [Apéndice F] es posible evidenciar que el método de cadena crítica que satisface la mayoría de las duraciones es el método de raíz cuadrada de suma de cuadrados, ya que las estimaciones con los buffers proporcionaron holguras que lograron satisfacer los tiempos reales de ejecución de las actividades de las subcadenas sin generar retrasos.

Excepto en el caso de la subcadena 4, la cual comprendía las actividades de la zona 7, el tiempo de ejecución de esta fue de 18 días, y las duraciones estimadas con los métodos fueron:

- La duración estimada por método de ruta crítica convencional es de 16 días.
- La duración estimada con el buffer de alimentación es de 14 días para el método de cortar y pegar.
- La duración de esta zona por el método de tercio crítico de 15 días.
- La duración estimada por medio del método de raíz cuadrada de suma de cuadrados es de 16 días.

A pesar de la cercanía de las estimaciones del método de ruta crítica y el método de raíz cuadrada de suma de cuadrados, ningún método logró amortiguar los posibles imprevistos de esta subcadena.

Con los datos del Apéndice F, es posible deducir que, las duraciones estimadas para las subcadenas en el método de raíz cuadrada de suma de cuadrados son similares a las del método convencional de ruta crítica, pero en el caso de la duración total del proyecto, se pueden apreciar grandes diferencias en las estimaciones.

En la etapa de seguimiento y control de los casos de estudio presentados en (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017) y en (Vázquez García, 2018) se realizan las gráficas Fever Chart, las cuales muestran el consumo de buffer de proyecto a medida que se ejecutan las actividades que lo componen. Teniendo en cuenta estos ejemplos, se realizan las gráficas para los métodos utilizados, de tal forma que se visualice el consumo del buffer a medida que avanza el proyecto y la región en la que se encuentre. Ver Figuras 15, 16 y 17. [Apéndice G]

Con las gráficas Fever Chart, fue posible determinar que el proyecto iba acorde a lo planificado más o menos hasta el 50% de su ejecución, luego, se evidencia un rápido incremento del consumo de buffer de proyecto hasta el final de la ejecución de este. En el caso del método CYP se hizo uso del 100% del buffer de proyecto, para el método TC se consumió el 89%, y en el método RSEM se tuvo un consumo de buffer con un porcentaje de 83%.

Por medio de estos datos, fue posible comprobar que, en las tres técnicas del método de cadena crítica, los buffers lograron amortiguar los imprevistos presentados en el proyecto, sin generar afectaciones negativas en las entregas y las fechas establecidas, y estimaron duraciones más cercanas a la realidad, evidenciando mayor proximidad que el método de ruta crítica.

El método que más se adaptó a los requerimientos del proyecto fue el método de raíz cuadrada de suma de cuadrados, en esta gráfica [Figura 17], se puede evidenciar que, a lo largo del proyecto, el buffer logró mitigar los efectos negativos consumiendo el buffer en porcentajes más bajos que los de las otras técnicas, demostrando que el porcentaje de consumo de buffer no fue tan crítico.

Figura 15.

Fever Chart – Método Cortar y Pegar.

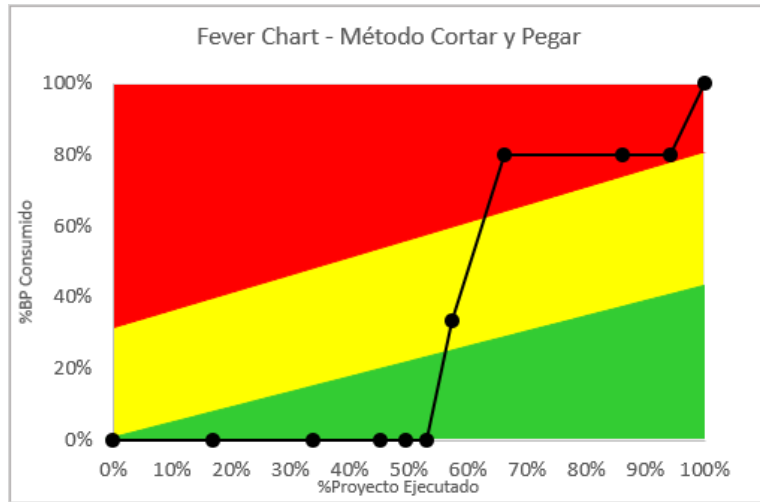


Figura 16.

Fever Chart – Método Tercio Crítico.

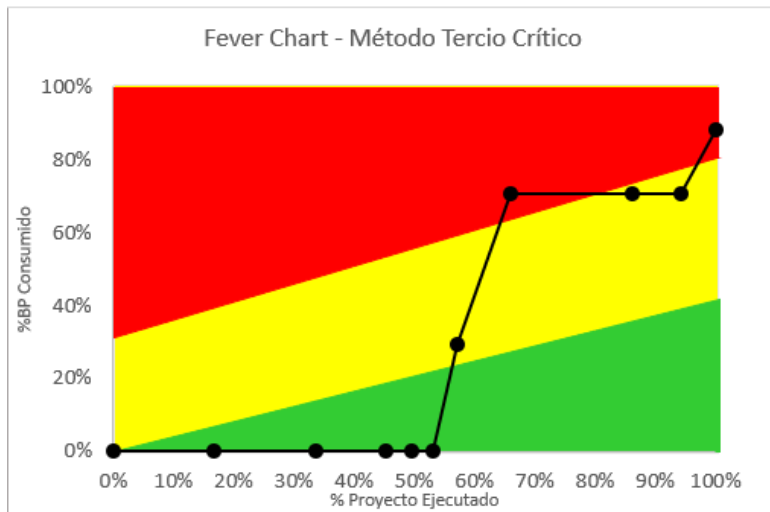
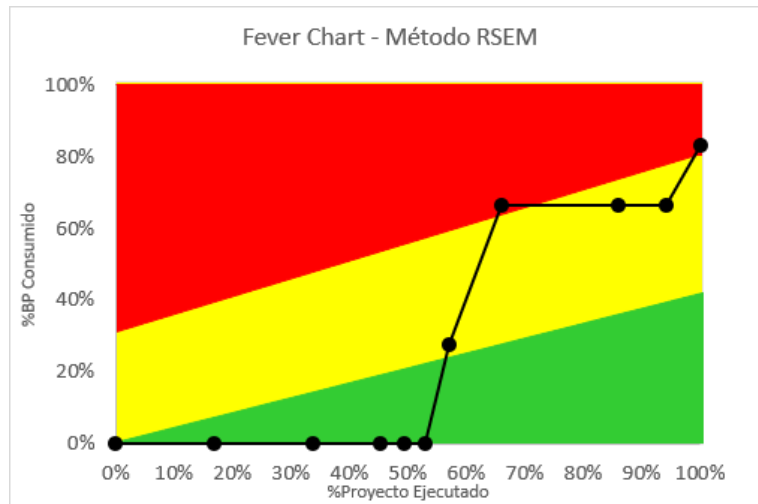
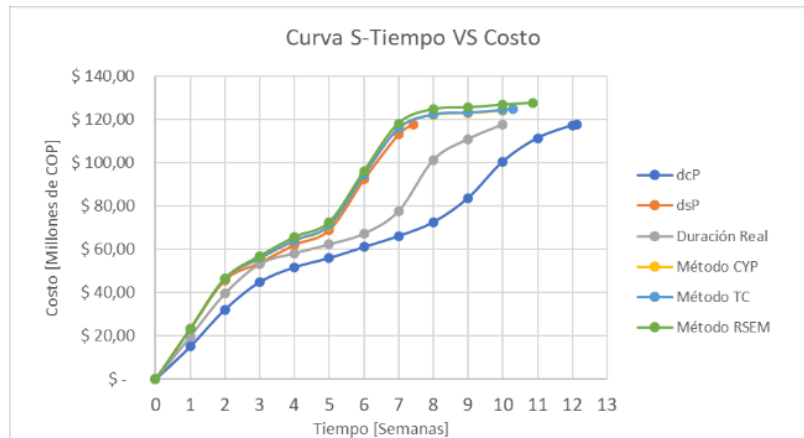


Figura 17.*Fever Chart – Método Raíz Cuadrada de Suma de Cuadrados*

Con los recursos reales destinados para el proyecto en estudio, se hizo una comparación gráfica entre el tiempo (en semanas) y costo del proyecto, por medio de una curva S, que compara el método de ruta crítica convencional, los métodos de cadena crítica y la duración real. Considerando que los recursos reales se toman como un valor fijo, y los buffers adquieren un valor adicional que tiene en cuenta la mano de obra y equipos utilizados, esto para notar la diferencia entre las curvas S de los métodos de cadena crítica y la de duraciones sin protección.

Esta curva S permite visualizar el avance del proyecto en el tiempo, la rapidez en la ejecución de las actividades, y la diferencia de duraciones entre lo proyectado y lo ejecutado, como se evidencia en la Figura 18. [Apéndice H]

Figura 18.*Comparación Curvas S.*

Las curvas S de los métodos de cadena crítica presentan una diferencia notoria al compararlas con la curva S del método de ruta crítica con respecto a la duración y el consumo de los recursos. En el método de ruta crítica se evidencia como durante el avance del proyecto se consumen menos recursos semanalmente, pero su duración es más extensa, caso contrario a lo que sucede con los métodos de cadena crítica, ya que, por medio del consumo de recursos, se evidencia que se realizan las actividades con más rapidez, generando una finalización más pronta al proyecto. Esto causado por la diferencia del manejo de la incertidumbre y los márgenes de seguridad.

Las gráficas de los métodos de cadena crítica y la duración real se asemejan en las primeras semanas de ejecución, luego, se empiezan a reflejar diferencias entre la semana 6 y la semana 8, debido a que, en este momento, se inicia el consumo del buffer de proyecto, se utilizan 12 días del buffer para amortiguar los imprevistos de la zona 2. Para la semana 9 y 10, a pesar de que disminuyó, sigue existiendo una diferencia entre ellas, ya que se hace uso de 3 días de buffer para la zona 4, y finalmente, logran satisfacer la duración real sin retrasos.

La curva S del método de ruta crítica y la de la duración real presentan diferencias en la rapidez de la ejecución de las actividades semanalmente, se observa mayor avance en la curva del

proyecto real, esto reflejado al comparar el consumo de recursos a medida que progresa el proyecto, evidenciando una finalización más temprana a comparación de lo estimado con este método.

8. Conclusiones

Por medio de los datos de un proyecto de adecuación real, se realizó una estimación de la ruta crítica por zonas de ejecución, se evidenció que las duraciones de las actividades podían estar sobreestimadas debido a la inclusión de márgenes de seguridad individuales, lo cual generaba una incidencia en la duración total del proyecto, es decir, un proyecto más extenso. El dimensionamiento de buffers es una alternativa que permite dar manejo a esta incertidumbre, proporcionando márgenes de seguridad globales que pueden ser monitoreados a medida que se realizan las actividades del proyecto, logrando tomar medidas correctivas y así controlar el progreso y buen curso de su ejecución.

El estudio comparativo de las duraciones estimadas en el método de ruta crítica convencional y el método de cadena crítica evidencia que el uso de duraciones sin protección y amortiguadores permite reducir el tiempo total de ejecución del proyecto sin desestimar los imprevistos, tal como lo indica Vázquez, Amiama y Barrasa en (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2017) y (Vázquez, Amiama, & Barrasa, 2015). Adicional a esto, se obtienen beneficios en las estimaciones de tiempo ya que alcanzan resultados más confiables y próximos a las duraciones reales.

Evaluando el estado físico y cumplimiento de los entregables, la opción del método de cadena crítica más acertada con los tiempos estimados para el proyecto de adecuación fue el de raíz cuadrada de suma de cuadrados, debido a que logró mitigar la incertidumbre a lo largo del proyecto, tanto de la cadena crítica como de las subcadenas, sin consumir el buffer en su totalidad, y registró duraciones previstas afines a lo que se realizó durante la ejecución de la obra, en la cual se trabajó por zonas.

El método de cadena crítica es una alternativa a considerar por los gestores de proyectos debido al diferente manejo de la incertidumbre. La generación de holguras por medio de buffers permite la solución de imprevistos sin llegar a afectar las fechas límites de entrega, por medio de duraciones con más asertividad sin necesidad de sobreestimar los tiempos de ejecución. Además, durante la etapa de seguimiento y control, es posible evaluar el progreso de la cadena crítica mediante los Fever Chart como lo plantea Newbold en (Newbold., 2011) y (Newbold, 2010) y tomar las medidas necesarias para el cumplimiento de este.

9. Recomendaciones

Es necesario seguir utilizando las estimaciones de duraciones obtenidas a partir de las técnicas del método de cadena crítica en diferentes proyectos de construcción, de tal forma que se valide la asertividad y confiabilidad de estos resultados frente a las duraciones reales.

Referencias Bibliográficas

- Apaolaza Pérez De Eulate, U., & Zubillaga, A. (Sept de 2005). *“La aportación de la ‘Cadena Crítica’ frente a la gestión clásica de proyectos.”* . Obtenido de IX Congreso de Ingeniería de Organización, pp. 1-10: <https://bit.ly/3d4SumV>
- Barrios, J. (2020). *“Impacto de la aplicación de la cadena crítica en la planeación de obras civiles: Caso de estudio”* . Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Construdata. (2022). *“Construdata – Portal Especializado en Construcción”*. Obtenido de <https://www-construdata-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/presupuestar>
- Garabito López, J., & Garabito Gregorio, F. (2011). *Organización de obras en ingeniería de edificación. Programación de obra: Métodos de la ruta crítica.* . Burgos, España: Universidad de Burgos.
- Goldratt, E. (1997). *“Critical Chain: A business novel”*.
- González-Cruz, M. C., Asensio-Cuesta, S., Diego-Más, J. A., & Alcaide-Marzal, J. (Jul de 2009). *Análisis del método de la cadena crítica vs método del camino crítico. Viabilidad y conceptos]*. Obtenido de <https://bit.ly/3Spz7F1>
- INVIAS. (2022). *“INVIAS - Instituto Nacional de Vías”*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/analisis-precios-unitarios>
- Modern management systems a construction industry cost effectiveness project report.* (Jun 1982). New York.
- Newbold, R. (Sept de 2010). *“Scheduling for Success with Critical Chain”*, ProChain Solutions Inc. Resource Center . Obtenido de <https://www.prochain.com/>

- Newbold., R. (16 de Oct de 2011). “*Fever Chart Regions*”, [Blog ProChain], . Obtenido de ProChain Solutions Inc.: <https://www.prochain.com/fever-chart-regions/>
- Project Management Institute. (s.f.). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK). Vol.1*, . 2017.
- Valderrama, F., & Mattos, A. (2014). “*Métodos de planificación y control de obras: Del diagrama de barras al BIM*”. Editorial Reverté: Barcelona.
- Vázquez García, E. (2018). “*Aplicación del método de la cadena crítica al sector de la construcción*”. Santiago de Compostela, España: Universidade de Santiago de Compostela.
- Vázquez, E., Amiama, C., & Barrasa, M. (Jul de 2015). “*Approach to the application of the critical chain method to the construction projects*”, *19th International Congress on Project Management and Engineering*, pp. 1-12. Obtenido de <https://bit.ly/3vyyQpq>
- Vázquez, E., Amiama, C., & Barrasa, M. (Jul de 2017). “*Critical chain: Sizing the project buffers*,” *21st International Congress on Project Management and Engineering*, pp. 1 -13. Obtenido de <http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/338/AT01-011.pdf>