

EXPLORACIÓN DE LA TEORÍA DE RESTRICCIÓN Y SU APLICACIÓN EN LA
PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN.

Exploration of the theory of constraints and its application in the planning and
control of construction projects.

ANDRÉS GÓMEZ BLANCO

Trabajo de grado

Asesor

Luis Fernando Botero Botero

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN

2021

CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	13
OBJETIVOS.....	14
GENERAL.....	14
ESPECÍFICOS.....	14
DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA.....	16
Levantamiento estado del arte.....	16
Determinación de la obra piloto.....	20
Desarrollo planificación TOC.....	21
Tipo de entrevista realizada.....	21
Seguimiento avance de obra con la programación aplicada TOC.....	21
Conclusiones sobre los beneficios de TOC.....	21
MARCO TEÓRICO.....	22
ORIGENES DEL TOC.....	22
PARALELO ENTRE PLANIFICACIÓN TRADICIONAL (CPM) Y TOC CADENA CRÍTICA.....	24
BUFFERS (AMORTIGUADORES) EN TOC.....	27
Buffer del proyecto (PB).....	28
Buffer de alimentación (FB).....	28

Buffer de recurso (RB).....	28
TAMAÑO DE LOS BUFFERS.....	29
Método de Cortar y Pegar (CP).....	31
Método del Tercio Critico (TC).....	32
Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados (ROOT).....	32
CONTROL Y SEGUIMIENTO DE PROYECTOS CON CCPM.....	36
ESTADO DEL ARTE.....	41
RESULTADOS.....	51
SELECCIÓN DEL PROYECTO PILOTO.....	51
PLANIFICACIÓN A PARTIR DE LA METODOLOGÍA CPM.....	53
PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO A PARTIR DE LA CADENA CRITICA.....	56
DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE LOS BUFFERS.....	63
Método de Cortar y Pegar (CP).....	63
Método del Tercio Critico (TC).....	66
Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados (ROOT).....	68
SOCIALIZACIÓN DEL CRONORAMA RESULTANTE CON TOC.....	70
SEGUIMIENTO DE OBRA CON EL CRONOGRAMA TOC.....	72
Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados (ROOT).....	75
Método de Cortar y Pegar (CP).....	77
Método del Tercio Critico (TC).....	79
CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS.....	90
ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Filtros utilizados en las 3 bases de datos bibliográficas, donde (n) es el número total de resultados arrojados.....	18
Figura 2. Recopilación por año de publicación.	19
Figura 3. Cinco pasos de la teoría de restricciones (TOC).	23
Figura 4. Modelo de planificación por CPM.	25
Figura 5. Modelo de planificación por el método CCS	26
Figura 6. Ejemplo de cronograma aplicando la teoría de restricciones.....	35
Figura 7. Representación diagrama de fiebre.	37
Figura 8. Ejemplo de cronograma aplicando la teoría de restricciones, con atraso.	38
Figura 9. Representación del seguimiento del ejemplo de la figura 5 en el diagrama de fiebre.....	40
Figura 10. Planta primer nivel proyecto primera fase primera etapa del campus Aburra sur.	52
Figura 11. Render proyecto sede aburra sur Tecnológico de Antioquia.	53
Figura 12. Enfoque CPM	54
Figura 13. Capítulos cronograma de obra y diagrama de Gantt método CPM.	55
Figura 14. Ruta crítica proyecto piloto.	56
Figura 15. Diagrama de Gantt con las duraciones de las actividades de la cadena crítica.	58
Figura 16. Cadena crítica con el método cortar y pegar.	65
Figura 17. Cadena crítica con el método tercio crítico.	67
Figura 18. Cadena crítica con el método de la raíz cuadrada.....	69
Figura 19. Seguimiento con CPM obra piloto.....	74
Figura 20. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando el método de ROOT para el dimensionamiento de los buffers.	76
Figura 21. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando el método de CP para el dimensionamiento de los buffers.....	78

Figura 22. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando el método de TC para el dimensionamiento de los buffers.	80
Figura 23. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando los tres métodos para el dimensionamiento de los buffers.	81
Figura 24. Ubicación fechas de corte.....	84
Figura 25. Controles por semana.....	87

RESUMEN

Hoy en día en las obras de construcción tanto públicas como privadas se presentan retrasos de forma frecuente, dando como resultado sobrecostos e incumplimiento a los clientes finales; el mercado actual obliga a los profesionales encargados de la gestión de proyectos a comprimir los cronogramas, para reducir plazos, sin incrementar costos y manteniendo la calidad del proyecto.

Por esta razón, dicho sector ha marcado una tendencia en los últimos años a la búsqueda de nuevas metodologías de planificación, control y seguimiento de proyectos.

La finalidad de este trabajo de grado es analizar y presentar los resultados generados al aplicar la filosofía de la teoría de restricciones (TOC) en la planificación de un proyecto piloto de construcción, planificado inicialmente bajo la metodología de la ruta crítica. Comparando esta filosofía contra la metodología tradicional se busca identificar y demostrar los beneficios de la implementación de TOC en el proyecto seleccionado. De esta manera evaluar su eficacia y flexibilidad para proyectos futuros, en donde se podrán dar sugerencias y recomendaciones en el momento de su aplicación; teniendo en cuenta las diferentes metodologías que se pueden utilizar para lograr un cronograma mucho más preciso.

Palabras clave: Teoría de restricciones; cadena crítica; gestión del proyecto de construcción; método de la ruta crítica.

ABSTRACT

Nowadays public and private projects are exposed to frequent delays, these delays usually generate budgets over costs and overdue schedules to final customers. This situation forces the project managers to reduce times and deadlines without compromising costs and quality.

For a few years there's a known trend in this segment searching new project planning and controlling technologies.

The objective of this thesis is to analyze and report the outcome of applying TOC theory to a pilot project developed earlier using Critical Path Method (CPM). When comparing this philosophy against the traditional method and demonstrating the benefits of TOC applied to a project, its necessary to implement the Critical Chain Method (CCM) to develop a new schedule.

Hence evaluating the effectiveness for future projects, where suggestions can be presented at the final deadline, taking into account the various methodologies that can be used to build a more precise Schedule.

Keywords: Theory of constraints; critical chain; construction project management; critical path method.

INTRODUCCIÓN

Eliyahun M. Goldratt en su obra *The Goal* (1992) considera que cualquier sistema debe tener al menos una restricción que afecte su rendimiento, la cual se define como todo aquello que impide avanzar hacia un objetivo o una meta, de lo contrario, este aumentaría sin límite o iría a cero. Teniendo en cuenta esta consideración Goldratt crea la teoría de las restricciones TOC (Theory of Constraints) que es una metodología que permite identificar el factor limitante más importante, es decir, la restricción, la cual obstaculiza alcanzar un objetivo o meta propuesta. Al identificar dicho factor se deben tomar las acciones necesarias para que no sea más una restricción. Gracias a la creación de esta teoría y el éxito que ha tenido en diferentes campos, algunos investigadores han dedicado centrar su aplicación en el sector de la construcción en la rama de la planificación de la obra. Yang, J.B. (2003), Leng Kaijun Shi Wen, Hu Xuejun y Pan Lin (2017) plantean diferentes alternativas de aplicación de la TOC en dicha rama, utilizando diferentes metodologías como la Cadena Crítica.

El método analítico de planificación y gestión de proyectos de la cadena crítica fue desarrollado por Eliyahu M. Goldratt en su libro *Critical Chain* en 1997, donde establece que las tareas no deben llevar protección individual para lograr concentrar esta seguridad en determinados puntos claves del proyecto; de esta forma las actividades quedan protegidas mediante los denominados buffers que permiten escudar la fecha límite del proyecto, dándole una mayor protección a la cadena crítica.

La incertidumbre en los proyectos de construcción causa un gran número de interrupciones en los cronogramas, generando así el incumplimiento de los objetivos establecidos de la obra; la mayoría de los métodos de programación se centran en acortar la duración del proyecto y optimizar la organización de sus actividades (Sarkar, Jhan & Patel 2018). Al utilizar la filosofía TOC en la administración de proyectos, se logra identificar y gestionar adecuadamente los elementos que permiten acelerar la consecución de los proyectos de forma sostenida (Vazquez, Amiama & Barriasa, 2015) y así lograr completarlo dentro del plazo estipulado.

El caso de estudio en este trabajo de grado describe en el primer capítulo el planteamiento del problema, donde se define y estructura la idea central de la investigación; en esta sección se da a conocer la pregunta de investigación. Luego se continúa con la justificación donde se explican las razones y los motivos por los cuales se realiza la investigación, dando así a conocer en el capítulo siguiente los objetivos específicos y el objetivo general del trabajo. El diseño metodológico es el

capítulo a seguir, al mostrar los procedimientos para poder encontrar la respuesta a la pregunta de investigación. En el marco teórico se recopila los antecedentes o marco referencial y las consideraciones teóricas del tema que se va a tratar en la investigación el cual tiene como finalidad orientar, situar el problema de investigación dentro de un conjunto de definiciones y conocimientos. Por último, ofrecer conceptos de términos que serán empleados; en el estado del arte se citan los autores y se describen los trabajos que han desarrollado en los diferentes sectores de la industria que se ha logrado aplicar la filosofía de la teoría de restricciones, destacando aquellos relacionados con el sector de la construcción.

Los resultados encontrados en el seguimiento de la obra piloto se plasman en dicho capítulo, mostrando paso a paso como se fue realizando teniendo en cuenta conceptos y metodologías antes descritas en los capítulos anteriores. Finalmente se plantean las conclusiones que arroja el trabajo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las metodologías tradicionales utilizadas para la gestión y control de proyectos de construcción, como CPM y PERT no son consideradas las incertidumbres y los imprevistos que se pueden llegar a presentar en la obra, por lo tanto, los cronogramas pueden llegar a ser inciertos. De esta forma, el objetivo de la ejecución en el tiempo esperado, no se cumplirá. CPM tiene en cuenta que cualquier actividad del cronograma puede estar ligada a un retraso que sea realmente imprevisible, y la duración planificada de la actividad resulta ser completamente apropiada. Este no es siempre verdad, ya que muy a menudo la duración de las actividades son supuestos descabellados que pueden ser irrealmente breves (Street 2000).

Tanto en las obras de construcción públicas como privadas, es común encontrarse con una serie de factores externos como internos que pueden llegar a ocasionar los retrasos en su ejecución al compararla con la programación inicial de la obra; Burgos Marín, M., & Vela Ávila, D (2015) reportan resultados de las encuestas realizadas a diferentes ingenieros que trabajan o dirigen las obras, mencionando que la mayoría de las causas de retrasos en los proyectos de construcción recaen en 10 categorías: diferencias en las condiciones de campo, condiciones atmosféricas desfavorables, aceleración de trabajo (pérdida de productividad), cambios solicitados por el dueño, retrasos ocasionados por el dueño, cambios constructivos, suspensión del trabajo, error al cotizar los precios de materiales y equipos, errores en el expediente técnico y problemas misceláneos. A su vez de acuerdo con la investigación realizada por Moreno Natera, A. A., & Villa Sanmiguel, L. A. (2020) concluyen que los factores más relevantes causantes de los retrasos de estas obras son: errores de la logística, problemas de suministro de materiales, desconocimiento del proyecto y de la calidad de los materiales por parte de los profesionales encargados, alza de precios en materiales y errores en el proceso contractuales y de ejecución. Lo, T. Y., Fung, I. W., & Tung, K. C. (2006) realizaron una investigación sobre los retrasos en proyectos de construcción en Hong Kong, donde se concluye que unas de las causas de demora en la construcción se derivan de las variaciones solicitadas por el cliente, es decir cambios en los diseños; también se agrega a estas causas los imprevistos en el terreno y el factor climático. Otros de los autores que han centrado sus estudios en este tema fueron Gordo, Potes & Vargas (2017) donde evidencian que los motivos de retrasos en la fase de construcción del proyecto, muchas veces están fuera del control de los contratistas, las cuales se identifican como: modificación del alcance del proyecto, suministro

incompleto de dibujos y cambios frecuentes de diseño, mala planeación para el manejo ambiental y gubernamental, obstrucciones de la comunidad local y naturaleza del sitio. Como consecuencia, estos retrasos ocasionan afectaciones a la parte económica, ya que existe relación directa del presupuesto y la programación de obra y es muy común encontrarse con que las adiciones no solo son de tiempo, si no, también de dinero.

Al respecto en un estudio realizado por McKinsey Global Institute donde existen muchos sectores informales como en economías como Brasil, India y Nigeria se ha comprobado que los retrasos que se extienden por más de un año los costos adicionales de los proyectos pueden subir hasta el veinticinco por ciento (25%).

En Colombia, el porcentaje de retraso de las obras de construcción públicas es el 41% según lo indica el diario el Portafolio (2019); el GPI, gestor de proyectos de infraestructura, señala que de las 94 obras en desarrollo supervisadas por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), el Instituto Nacional de Vías (Invias), la Aerocivil y la Corporación Autónoma Regional Del Magdalena (Cormagdalena) 35 obras tienen dificultades y presentan retrasos; igualmente el periódico El Colombiano en el año 2020, a partir de un estudio realizado por la cámara colombiana de infraestructura (CCI), reporta que en 94 contratos de obra pública que se encontraban en ejecución, el 73% de estas tenían retrasos, es decir unas 361 obras de las 494 las cuales se encuentran en ejecución desde el año 2015.

Las entregas tardías, los sobrecostos y la baja productividad están directamente relacionados con el pobre desempeño en el sector de la construcción; al realizar las programaciones de obra con tiempos de seguridad adicionales en cada una de las actividades, se incentiva a los constructores a que cada una de estas se puede llegar a ejecutar en un tiempo mucho mayor al que en verdad se podría hacer, dando como resultado una productividad en la mano de obra muy baja. La consultora McKinsey indica que, en el mundo, el crecimiento de la productividad laboral en la construcción ha aumentado en promedio solo el 1 por ciento anual en las últimas dos décadas, en diferencia al sector manufacturero con un crecimiento del 3.6% y un 2.8% en la economía mundial, donde claramente es notable el desempeño inferior en este sector, (The McKinsey Global Institute 2017).

La mayoría de los autores se centran en encontrar causas ajenas al sistema de planificación en el retraso de la ejecución de los proyectos, dejando a un lado las metodologías con las que normalmente se desarrollan los proyectos de construcción, estas metodologías tradicionales como los métodos PERT y CPM se basan en medir el desempeño como un porcentaje del trabajo completado o en el tiempo invertido, el problema radica en que estas medidas no indican cuanto tiempo se requiere para completar la tarea. (Izmailov, Korneva, Kozhemiakin, 2016). Sin embargo, algunos otros han identificado otra metodología denominada la teoría de restricciones (TOC) la cual sostiene que, en un proyecto, el factor clave es el tiempo de entrega general, desde el principio hasta la finalización del proyecto, al igual establece que el tiempo de ejecución general se ve directamente afectado por el diseño del proyecto y la falta de recursos; sin embargo el concepto de la ruta crítica únicamente considera la secuencia más larga de tareas en un plan de proyecto como el factor clave para determinar la ruta crítica, mientras que TOC como se mencionó, la disponibilidad de recursos es igual de importante. (Basu, 2000). Otra de las diferencias entre estas dos metodologías es que, en el método de la ruta crítica, si se completa una actividad antes del tiempo estimado el intervalo de tiempo no se agrega a la actividad sucesora, pero los retrasos; en la cadena crítica el cálculo del buffer se basa en el conjunto de actividades, es decir la ganancia de tiempo o retraso se pasa a lo largo de las actividades de la cadena y los buffers (Pai & Giridharan, 2012).

A partir de diferentes ejercicios que se han desarrollado y las investigaciones realizadas es posible encontrar diferentes aplicaciones que han beneficiado la planificación de los proyectos aplicando la teoría de restricciones; por lo tanto, esta investigación pretende responder a la pregunta. ¿cuáles son los beneficios que se pueden obtener al aplicar TOC en la planificación de proyectos de construcción?

JUSTIFICACIÓN

Los retrasos y sobrecostos de los proyectos de construcción son un factor de preocupación en el gremio de la construcción, por lo cual abordar dicha problemática es importante.

Diferentes autores han encontrado métodos alternos para poder mitigar al máximo dichos inconvenientes y poder adaptarlos según las necesidades de cada obra, como la filosofía TOC, que ya ha sido probada y evaluada en diferentes sectores industriales y en algunos casos en el sector de la construcción.

Al ser una filosofía poco adoptada actualmente en la gestión de proyectos de construcción en Colombia y el mundo, es importante recopilar diferente información y aplicarla de manera práctica a una obra piloto, para conocer las ventajas y diferencias que puede llegar a tener con respecto a las metodologías normalmente utilizadas, lo cual genera nuevas alternativas y nuevo conocimiento en un sector muy tradicional donde se lleva trabajado de la misma forma durante muchos años.

Al aplicar dicha teoría en los cronogramas de obra tradicionales se busca poder mejorar el sistema de planificación de proyectos de construcción. Lo anterior es foco de interés para las diferentes empresas de construcción tanto para el sector público como privado, promotores de proyectos, entidades contratantes y usuarios finales; de esta forma poder implementar diferentes alternativas al rebajar la incertidumbre que no abordan los sistemas tradicionales para la elaboración de cronogramas de obra podría conducir a que cada día se vaya reduciendo el porcentaje de atraso en la finalización de las diferentes obras desarrolladas en el país. Uno de los impactos positivos que se puede llegar a lograr al aplicar la filosofía de la teoría de restricciones es evitar prorrogas de contratos y a su vez incrementar los gastos de la ejecución de obra. Al presentar cronogramas de obra mucho más ajustados a la realidad y enfocarse en las incertidumbres de los diferentes proyectos, esto podría redundar en un mayor cumplimiento en los plazos de las fechas estipuladas. En obras de infraestructura se disminuiría todos los costos que se relacionan con los retrasos, igualmente al inicio de la construcción y durante su ejecución se reducen las probabilidades de retrasos por contar con cronogramas de obra más fiables.

OBJETIVOS

GENERAL

Identificar los beneficios de la implementación de la teoría de restricciones en la planificación y seguimiento de proyectos de construcción, a partir de un caso de estudio al compararlo con una programación llevada por métodos tradicionales .

ESPECÍFICOS

1. Levantamiento del estado del arte sobre aplicación de teoría de restricciones en la planificación de proyectos de construcción.
2. Seleccionar un proyecto piloto de construcción para desarrollar su planificación a partir de TOC.
3. Desarrollar una planificación con los principios de TOC para el proyecto piloto a partir del cual se realice el seguimiento de este para determinar las bondades de la metodología.
4. Socializar con los desarrolladores del proyecto el cronograma resultante donde fue aplicada la TOC, para escuchar las percepciones y comentarios sobre este.
5. Realizar un seguimiento del avance de obra de acuerdo con el cronograma TOC para poder obtener datos reales y conocer la diferencia utilizando la metodología tradicional con la filosofía TOC.
6. Concluir sobre los beneficios de utilizar la teoría de restricciones en la programación de proyectos de construcción.

DISEÑO METODOLÓGICO

La investigación realizada y reportada en este documento es mixta, con un enfoque cualitativo donde se muestra las percepciones de los actores sobre la nueva metodología y cuantitativo al tener mediciones sobre los avances de la obra y consumo de los buffers. Para poder realizar dicha investigación se utilizó un estudio de caso real (obra en construcción) para poder estudiar la metodología TOC y aplicarla en la planificación de un proyecto, así poder evaluarla a través de resultados de seguimiento del proyecto piloto y concluir sobre los beneficios que esta tiene en los cronogramas de obra y en los tiempos de entrega finales.

En la siguiente tabla se muestra el desarrollo de las fases de investigación y las herramientas utilizadas para dar cumplimiento a los objetivos específicos del proyecto.

Fases del proyecto	Objetivo específico	Herramienta metodológica
Recopilación de información.	Levantamiento del estado del arte	Revisión de la literatura proveniente de diferentes bases de datos científicas.
Aplicación de la teoría de restricciones en la planificación del proyecto.	Selección proyecto piloto	Filtración y selección del proyecto a partir de criterios como la duración y comienzo en fecha similar a la investigación.
	Desarrollar una planificación con TOC	Método de la cadena crítica a partir del software Lynx Scheduler.
	Socializar con los desarrolladores del proyecto el cronograma resultante e identificar las percepciones de los participantes.	Entrevistas semiestructuradas.
Seguimiento del proyecto.	Realizar un seguimiento del avance de obra de acuerdo con el cronograma TOC para poder obtener datos reales y conocer la diferencia utilizando la metodología	Control de avance semanal y reporte.

		tradicional con la filosofía TOC.	
Análisis resultados	y	Concluir sobre los beneficios de la TOC en la planificación de proyectos.	Verificación de resultados de ejecución del proyecto a partir del seguimiento con la cadena crítica, para determinar beneficios frente al método de CPM.

DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA.

Levantamiento estado del arte.

Para poder realizar la revisión sistemática de la literatura se centralizaron las búsquedas en las siguientes bases de datos: Scopus, ScienceDirect y Google Scholar.

Para la búsqueda en la base de datos de Scopus se tomó como palabra clave: "Theory of constraints" lo cual arrojó ciento sesenta y cinco mil novecientos trece (165913) documentos. Posterior a esto se empezó a filtrar la información con las ecuaciones de búsqueda de la siguiente forma:

Se dejaron como palabras claves Theory of constraints AND construction scheduling el cual arrojó doscientos cincuenta y siete resultados en la búsqueda (257); con este resultado y teniendo en cuenta que la teoría de restricciones es por primera vez presentada en el año 1984 por su autor Eliyahu M. Goldratt da una fecha de inicio de búsqueda. Paso siguiente se utiliza el operador OR donde relaciona la unión de los términos anteriores junto con la palabra clave "Engineering", para llegar a los artículos, al igual se utiliza el operador NOT para excluir los resultados con temas relacionados en energía; llegando a ciento cincuenta y ocho (158) resultados. Para finalizar se adiciona un operador de truncamiento ("") para la palabra clave "critical chain" para poder encontrar dicha palabra en los documentos ya filtrados, se obtiene un total de veinte tres (23) artículos. Para finalizar se adjunta una última palabra clave "buffer" obteniendo nueve (9) resultados.

Igualmente se realizó una búsqueda en ScienceDirect aplicando los mismos filtros y utilizando las palabras claves que se utilizaron en la base de datos bibliográfica anterior, dando los siguientes resultados.

- Theory of constraints (634327) resultados.
- Theory of constraints AND construction scheduling (28738) resultados.
- (Theory of constraints AND construction scheduling) OR (Engineering NOT Energy) (8520) resultados.
- (Theory of constraints AND construction scheduling) OR (Engineering NOT Energy) OR (“Critical Chain”)(2077) resultados.
- (Theory of constraints AND construction scheduling) OR (Engineering NOT Energy) OR (“Critical Chain”AND “Buffer”) (438) resultados.

Paso siguiente se filtra por “Article type” donde se seleccionan los artículos de investigación, ya que las otras categorías son noticias, discusiones, comunicados cortos, entre otros; obteniendo un total de doscientos sesenta y cinco (265) artículos. Para finalizar se utiliza el filtro de acceso abierto en “Access type” y arroja veintidós (22) resultados.

Para la base de datos Google Scholar también fueron utilizados los siguientes filtros, dando como resultados:

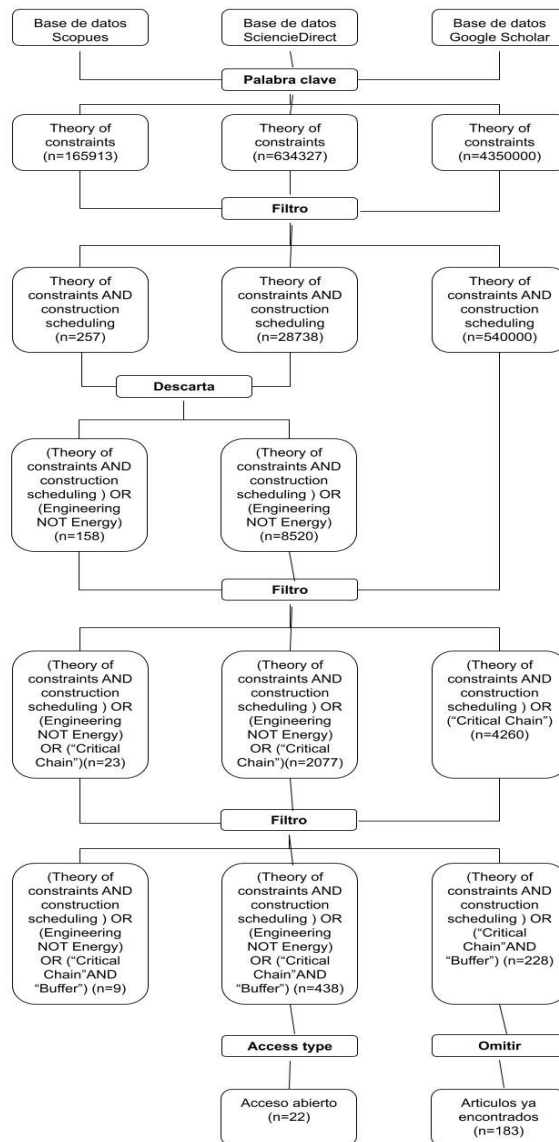
- Theory of constraints (4350000) resultados.
- Theory of constraints AND construction scheduling (540000) resultados.
- (Theory of constraints AND construction scheduling) OR (“Critical Chain”) (4260) resultados.
- (Theory of constraints AND construction scheduling) OR (“Critical Chain”AND “Buffer”) (228) resultados.

Comparando estos resultados con los ya seleccionados en la base de datos Scopus, por título de investigación, se reducen los resultados a doscientos cinco (205); de esta misma forma con Science Direct para un total de ciento ochenta y tres (183) resultados

Al final se encuentra un total de doscientos catorce (214) artículos, para los cuales se llega más a fondo leyendo los abstract y ver el enfoque que cada autor le dio a su investigación, y así al conocer estos enfoques se utiliza el operador NOT para descartar los temas relacionados con negocios, energía nuclear, ciencias de la decisión, entre otros. Teniendo en cuenta esto se llega a cincuenta y tres (53) artículos investigativos relacionados con la teoría de restricciones aplicada a la programación de una obra de construcción, descartando los artículos relacionados con otras industrias y otros enfoques.

Para dar más claridad a los filtros y palabras utilizados en estos se recopila la información anterior en el siguiente diagrama.

Figura 1. Filtros utilizados en las 3 bases de datos bibliográficas, donde (n) es el número total de resultados arrojados.



Fuente:

Elaboración propia

Igualmente se muestra cronológicamente los artículos publicados desde el año 1998 hasta el año presente, donde se evidencia un crecimiento sobre las investigaciones realizadas en la aplicación de teoría de restricciones en los cronogramas de obra y las distintas metodologías utilizadas para su aplicación; y una tabla resumen donde se evidencia los países donde fueron publicados los artículos y los años de publicación.

Figura 2. Recopilación por año de publicación.



Fuente:

Elaboración propia.

Tabla 1. Fecha y país de publicación de las diferentes investigaciones relacionadas en el documento. (Fuente elaboración propia).

País de publicación.	Numero de publicaciones.
Australia	1
Bélgica	2
Brasil	1
Chile	1
China	7
Colombia	3
Egipto	1
España	6
Hong Kong	1
India	2
Indonesia	1
Irán	2
Israel	1
Japón	2
Polonia	2
Reino Unido	1
Rusia	1
Singapur	1
Taiwán	1
Usa	16

Fuente:

Elaboración propia.

Determinación de la obra piloto.

Para poder seleccionar el proyecto adecuado para el trabajo se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- Fecha de inicio y finalización de la obra.
- Sistema constructivo.
- Área total construida.
- Número de actividades.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se toma como criterio mas importante la coincidencia de la ejecución de la obra con el periodo de investigación y la duración de ambos.

Desarrollo planificación TOC.

El proyecto piloto se desarrolla bajo la planificación tradicional (CPM), por lo cual es recomendable utilizar un software donde sea posible aplicar el método de la cadena critica en dicho cronograma, para esto se utiliza el software Lynx Scheduler (Lynx Critical Chain Project Management software)

Tipo de entrevista realizada.

Para lograr socializar e identificar la percepción de cada uno de los entrevistados primero se dan a conocer los conceptos básicos de la filosofía TOC y se muestra el resultado del nuevo cronograma aplicada dicha filosofía, luego se opta por realizar entrevistas semiestructuradas.

Seguimiento avance de obra con la programación aplicada TOC.

El seguimiento y el control de la obra se realiza de forma diaria con controles semanales, es decir cada semana se calcula el avance programado y ejecutado de la obra, donde fácilmente se puede obtener el porcentaje de retraso o adelanto de esta.

Conclusiones sobre los beneficios de TOC.

Al tener toda la información del seguimiento de la obra con el nuevo cronograma con TOC, se determina los beneficios y diferencias de la metodología tradicional frente a esta nueva.

MARCO TEÓRICO.

ORIGENES DEL TOC.

La filosofía de teoría de restricciones (Theory of constraints o TOC) considerada como “una teoría general para dirigir una organización” (Goldratt 1988) fue desarrollada por Eli Goldratt a mediados de la década de 1980. Dicha filosofía evolucionó a partir del sistema OPT (Optimized Production Timetables) (Goldratt, 1980). En su libro la meta “the goal” desarrollado en forma de novela, cuenta como un gerente de una planta manufacturera logra evitar su cierre, al lograr mejorar la rentabilidad de la fábrica en tan solo tres meses aplicando la teoría de restricciones, que se centra en encontrar los “cuellos de botella” , que son las restricciones que se tienen en la producción, en este caso, aquellas unidades cuya capacidad es igual o menor de lo que el mercado espera del proceso. TOC proporciona la metodología para definir qué cambiar, qué se debe cambiar y cómo efectuar el cambio para mejorar continuamente el rendimiento de todo un sistema (Huang, Chen, Chiu Chen 2013). El concepto de la Teoría de restricciones se puede resumir en:

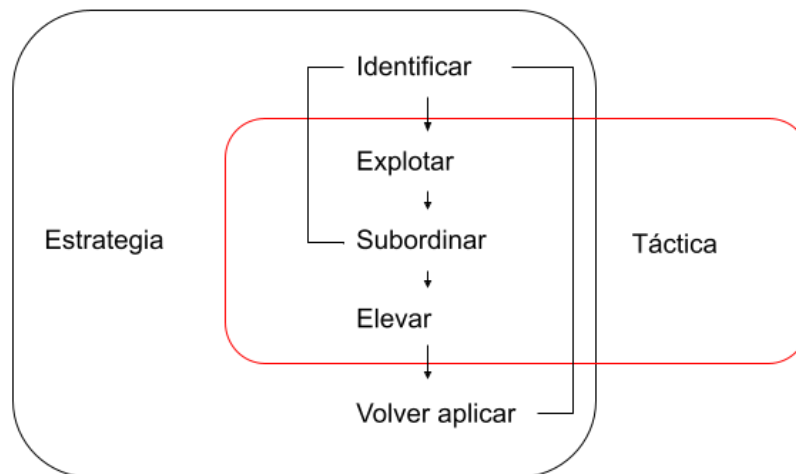
1. Todo sistema debe por lo menos tener una restricción. Si esto no es verdad, entonces un sistema real, como una organización con fines de lucro, generaría ganancias ilimitadas. Por lo tanto, se define como una restricción a “cualquier cosa que limite a un sistema para lograr un rendimiento superior en comparación con su objetivo” (Goldratt, 1988).
2. Al existir restricciones, esto representa oportunidades de mejora. TOC ve las limitaciones como positivas, debido a que las restricciones determinan el desempeño de un sistema, una elevación gradual de las restricciones del sistema da como resultado el mejoramiento de su desempeño (Rahman, 1998).

En los sectores donde se ha logrado implementar la TOC, la identificación de las restricciones es la base para mejorar el sistema de producción; según la teoría de restricciones, la implementación del sistema consta de cinco pasos, los cuales son secuenciales e instruyen a la concentración de esfuerzos en el componente del sistema que es capaz de producir el impacto más positivo (Trojanowska, Dostatni 2017).

1. Identificar la restricción del sistema. La restricción de un proyecto es la cadena crítica que domina el objetivo del proyecto el cual puede establecerse como la terminación a tiempo. La cadena crítica, considera los recursos y las dependencias lógicas.

2. Decidir como explotar la restricción del sistema. La duración total de un proyecto es la sumatoria de las actividades de la cadena crítica; CCS (Critical Chain Scheduling) desafía la duración tradicional de la estimación de CPM y elimina los tiempos de seguridad del proyecto.
3. Subordinar todo lo demás a la decisión anterior. Goldratt propuso el concepto de amortiguadores o buffers para proteger la cadena crítica y la ejecución del Proyecto.
4. Elevar la restricción del sistema. Se concentra la gestión de contingencia de todo el proyecto.
5. Si en los pasos pasados la restricción se rompe, volver al paso 1. No permitir que la inercia se convierta en la restricción del sistema. TOC insiste en la mejora continua para cumplir con el objetivo global del sistema no local. CCS permite que la persona encargada del seguimiento y control del proyecto re programe para lograr alcanzar el objetivo del proyecto.

Figura 3. Cinco pasos de la teoría de restricciones (TOC).



Fuente:

Goldratt 1990.

TOC es utilizado para desarrollar una técnica de gestión para el mejoramiento continuo del sistema, el cual consiste que cualquier sistema debe tener por lo menos una restricción que afecta el rendimiento del sistema.

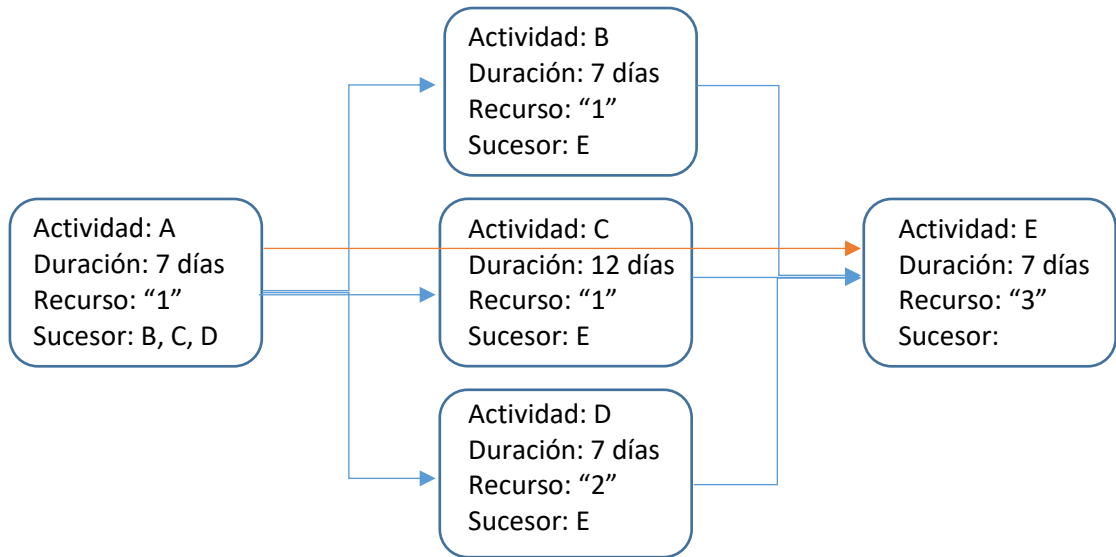
PARALELO ENTRE PLANIFICACIÓN TRADICIONAL (CPM) Y TOC CADENA CRITICA.

Goldratt define la cadena critica como la ruta más larga de actividades dependientes donde las dependencias son el resultado de considerar la usabilidad de los recursos por adelantado. La cadena critica proporciona el foco de todo el proyecto y los amortiguadores proporcionan un enfoque y criterio de decisión claros para el director del proyecto (Lench 1999). El proceso de asignación de recursos podría mostrar de manera más precisa y razonable el punto clave de la gestión del cronograma y el punto mismo donde se encuentran las limitaciones, lo que le da más pertinencia a la cadena critica, (Feng, Li, Yang, Hong, Pang, Yao & Wang 2011).

La diferencia básica entre CPM y CCS depende del tratamiento de las restricciones de recursos en la determinación de actividades críticas y en el uso y colocación de los buffers o amortiguadores en una red de programación; en la metodología CPM el tiempo de seguridad se extiende en cada una de las actividades, mientras que la red CCS concentra la seguridad en buffers, que son utilizados para proteger la fecha límite de entrega del proyecto y así mantener el enfoque en las actividades críticas. En CPM la ruta crítica es la cadena más larga desde el inicio hasta el final del proyecto que requiere el tiempo más largo para completar el proyecto, las cuales solo considera relaciones lógicas entre actividades, ignorando algo importante como los conflictos de los recursos, y la cadena critica es la cadena más larga de actividades dependientes donde las dependencias son el resultado de considerar la usabilidad de los recursos por adelantado. (Yang, 2003). Si se encuentra más de una cadena critica en un proyecto, se debe de elegir alguna de estas dos (Herroelen, Leus, Demeulemeester 2002).

En la figura 4 Y 5 se ilustra en un simple ejemplo la diferencia entre la planificación por CPM y el método CCS.

Figura 4. Modelo de planificación por CPM.

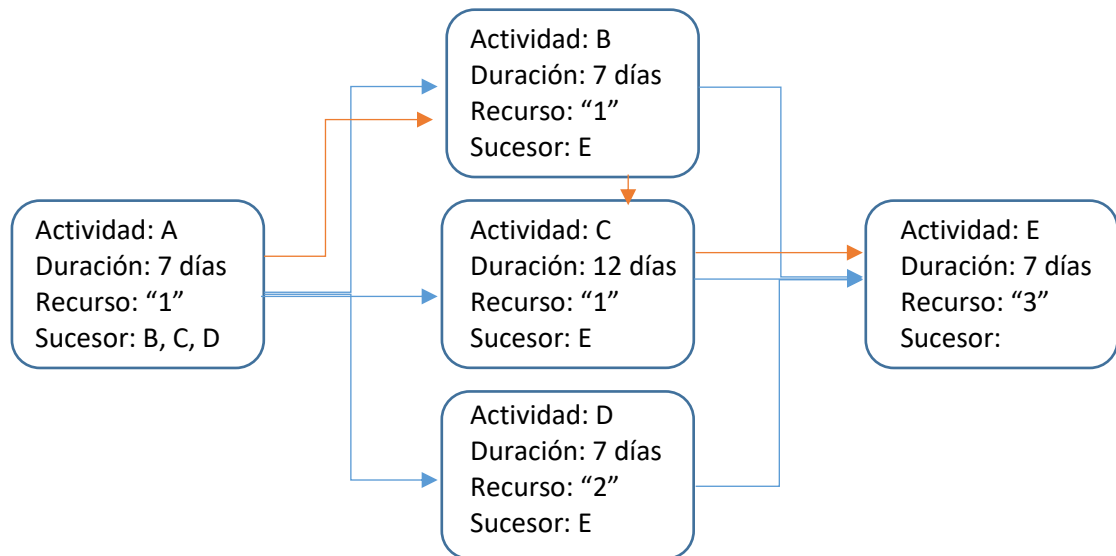


—> Ruta crítica, actividades A, C y E

Fuente:

Yang, 2003.

Figura 5. Modelo de planificación por el método CCS



→ Cadena crítica, actividades A, B, C y E

Fuente:

Yang, 2003.

Ruta crítica:

- consiste en la secuencia de actividades del proyecto que determinan el mínimo tiempo requerido de este (Nasution 1994).

Cadena crítica:

- conjunto de tareas que determinan la duración total del proyecto, teniendo en cuenta tanto la precedencia y dependencia de recursos (Herroelen, Leus 2001).
- la ruta más larga que no solo considera la precedencia, sino que también tiene en cuenta la dependencia de los recursos (Bie, Cui, Zhang 2012).

- Es la secuencia de actividades mas largas cuya duración total es el máximo del proyecto, teniendo en cuenta las restricciones de los recursos (Zhao, You & Lv 2008)

En la figura (1) se muestra que se incorpora la actividad “B” para determinar la cadena critica, esto se debe a que la cadena critica también tiene en cuenta los recursos de cada actividad, sus predecesoras y sucesoras y su fecha de inicio y final, es decir, la CC tiene en cuenta que una actividad que su sucesora tenga el mismo recurso y no se pueda ejecutar va a retrasar la fecha límite de plazo para la entrega del proyecto; por esta razón la ruta crítica tiene en cuenta los recursos, como se ve en la figura (1) la actividad A tiene un recurso denominado “1” y es la actividad con la que se inicia el proyecto, para la actividad siguiente, aunque se tiene como sucesoras las B,C y D se descarta la actividad D por tener un recurso diferente (Recurso “2”), teniendo como restantes las actividades B y C, en este caso ambas actividades tienen el mismo recurso, que como se comentó anteriormente es uno de los aspectos diferenciales en este método; y al final de la cadena critica se debe incluir la última actividad que se debe de realizar, en este caso la actividad “E”.

BUFFERS (AMORTIGUADORES) EN TOC.

A su vez para llevar el control y el seguimiento de los proyectos de construcción aplicando la TOC, se introducen los buffers o amortiguadores, los cuales son de tres clases, Buffer del Proyecto, Buffer de Alimentación y el Buffer de Recurso; cada uno de estos se encargan de proteger a la cadena critica de las interrupciones que pueden ocurrir durante la construcción del proyecto, al ser insertados en puntos estratégicos del cronograma con duraciones determinadas; para así llegar a cumplir con la entrega en la fecha estimada del proyecto; cuando las actividades tardan más de lo previsto en la programación, se consumen los buffers, cuando toman menos tiempo, los buffers se reponen, estos mejoran la efectividad específicamente en la fase del plan de construcción, (Jan & Ho 2006). Tanto el buffer de alimentación como el buffer del proyecto ha sido un tema de discusión sobre la forma como se debe calcular su tamaño, por esta razón diferentes investigadores han propuesto metodologías empíricas para poder realizar dichos cálculos, teniendo en cuenta que Goldratt en su libro Critical Chain sugiere utilizar el método Cut & Paste (cortar y pegar).

Los buffers son incorporados para ayudar a cumplir el objetivo de la finalización a tiempo del proyecto. A continuación, se explica la forma en la cual se identifican y dividen los buffers que se incorporan en la red del proyecto para facilitar la contingencia del proyecto.

Se debe tener en cuenta que para algunas actividades la duración es corta, pero su complejidad es alta, esto lleva a requerir más buffer; y por otro lado la duración de la actividad es muy larga y la complejidad es relativamente baja, es decir necesitaría un buffer más pequeño; por esto la complejidad de cada actividad debe ser considerada durante la asignación de los buffers (Zhang, Jia & Diaz 2018), los cuales pueden ser de 3 clases.

Buffer del proyecto (PB).

En la gestión de la cadena crítica, el buffer del proyecto se toma como parte de este y lo protege de la incertidumbre, el cual permanece activo durante todo el proyecto y no para las actividades individuales, (Pai & Giridharan, 2012).

El tiempo de cada actividad con protección (tiempo seguro) en la cadena crítica es removido de cada una de las actividades y es utilizado para crear el buffer del proyecto, el cual ayuda a proteger el proyecto de los retrasos (Jan, Ho 2006).

El buffer del proyecto se pone al final del mismo, es el que nos indicará la fecha límite o fecha final de la ejecución.

Buffer de alimentación (FB).

Se usa para proteger la cadena crítica en cualquier momento donde las actividades no críticas están conectadas a la cadena crítica, (Fallah, Ashtiani & Aryanezhad 2010), es decir evita las interrupciones de otras cadenas y se ubica al finalizar la subcadena que desemboca en la cadena crítica.

Este buffer permite que las actividades que desembocan en la cadena crítica (subcadena) se ejecuten antes de un tiempo determinado, dando lugar a un espacio de tiempo mientras dicha actividad finalice y alimente la cadena crítica, así logrando proteger a la cadena crítica de los retrasos producidas por las rutas paralelas (Bie, Cui, Zhang 2012).

Buffer de recurso (RB).

El buffer de recurso se ubica en la cadena crítica, y se utiliza para notificar al planificador de un nuevo recurso que se está empleando, al dar una advertencia y evitar alguna eventualidad que pueda producirse en el momento de la transferencia de una actividad a otra (Vázquez, Ares & Barrasa 2017). Se encuentra entre dos actividades consecutivas que tienen diferentes recursos.

Dicho buffer no ocupa tiempo en la red del proyecto, solo se utiliza como sistema de advertencia lo cual no va a afectar directamente el tiempo final del cronograma, más si, va a ayudar a identificar de manera anticipada alguna dificultad que pueda

generar los cambios de recursos y así tener el tiempo de actuar de manera eficiente para evitar algún retraso.

TAMAÑO DE LOS BUFFERS.

Goldratt propone que cada actividad puede realizarse sin los tiempos de seguridad, que es el tiempo adicionado a cada actividad para evitar algún retraso; en teoría de restricciones este tiempo se elimina, dejando las actividades únicamente con el tiempo justo para su ejecución; al eliminar el tiempo de seguridad de las actividades individuales se puede eliminar la principal causa de pérdida de tiempo y mitigar los impactos de las restricciones, (Jan & Ho 2006). Igualmente propone que el tamaño del buffer sea el 50% de la duración de los tiempos de protección, algo complicado de aplicar en la construcción de obras civiles donde la duración de cada actividad se estima según la experiencia que tiene el ingeniero o la persona que realiza dicho cronograma, además se coloca un tiempo adicional de seguridad para cada actividad. Se debe tener en cuenta que, si el tamaño del buffer es demasiado grande, la duración de la actividad será muy corta, en este caso, es difícil finalizar la actividad a tiempo y si el tamaño del buffer es demasiado pequeño y la duración de la actividad muy larga, no se estaría aplicando dicha metodología, ya que la actividad seguiría con un tiempo de seguridad (Zhang, Song & Diaz 2017).

Goldratt a su vez no especificó con que regla o instrucción se debe tomar en cuenta para determinar el tamaño de los buffers, pero sugiere un método denominado la ley del 50% también conocido como método de cortar y pegar (CP). Hoy en día diferentes investigadores han creado unas metodologías para el cálculo de este dimensionamiento, los cuales son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 2. Metodologías de dimensionamiento de buffers.

Métodos dimensionamiento de buffers	Autores
Cortar y Pegar	<ul style="list-style-type: none"> • Bie, Cui & Zhang (2012) • Tukul, Rom & Eksioglu (2006) • Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018) • Vázquez, Ares, Barrasa (2017)
Raíz cuadrada de la suma de cuadrados	<ul style="list-style-type: none"> • Bie, Cui & Zhang (2012) • Tukul, Rom & Eksioglu (2006) • Vázquez, Ares, Barrasa (2017)
Procedimiento adaptativo con escasez de recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Bie, Cui & Zhang (2012) • Tukul, Rom & Eksioglu (2006) • Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018)
Procedimiento adaptativo con densidad	<ul style="list-style-type: none"> • Bie, Cui & Zhang (2012) • Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018)
Error de raíz cuadrada con números difusos	Bie, Cui & Zhang (2012)
Raíz cuadrada de la suma de cuadrados más sesgo	Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018)
Ashtiani et al(2007) basado en la raíz cuadrada del error	Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018)
Procedimiento adaptativo de dimensionamiento de buffer	Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018)
Dimensionamiento de los buffers basado en la incertidumbre de las actividades del proyecto.	Fuentes Del Burgo, Ruiz Fernandez, Valverde Gascueña & Navarro Astor (2018)
El tercio critico	Vázquez, Ares, Barrasa (2017)

Fuente elaboración propia.

En la investigación realizada por Vázquez, Amiama & Barrasa (2017), se centran en la aplicación de tres de las 10 metodologías para el dimensionamiento de los buffers, y se aplican en el cronograma de obra de un proyecto de construcción; al

tener el mismo caso práctico, obras civiles de construcción, y viendo que estos métodos son utilizados por distintos autores se toma como base para la investigación estos tres:

Método de Cortar y Pegar (CP).

El método de dimensionamiento propuesto por Goldratt en su libro Critical Chain (1997) sugiere usar el 50% de la duración de las actividades como tiempo de seguridad, sin importar el nivel de incertidumbre, luego este tiempo se debe sumar tomando en cuenta que son las actividades que se encuentran en la ruta crítica o de las subcadenas, dependiendo del buffer a tratar y por último se mide este como la mitad de esta suma. Diferentes investigadores han defendido este método, como el método cortar y pegar (Tukel y Col 2006), Leach (2014) lo nombra el método de 50% de la cadena.

El dimensionamiento de los amortiguadores está definido por:

- Identificar las actividades que constituyen la cadena crítica y subcadenas
- Dejar dichas actividades sin el tiempo de protección
- Sumar los tiempos removidos de las actividades
- Reducir el 50% de este tiempo.

Este método por su simplicidad de cálculo no tiene en cuenta la variabilidad de las actividades, también es necesario recalcar que si se tienen unas duraciones muy largas en las actividades dará a lugar a unos buffers demasiado grandes.

López de Ávila (2009) sugiere seguir dos recomendaciones para intentar mitigar lo antes descrito.

- El 20% de duración de la cadena crítica no puede ser superado por ninguna actividad.
- El 25% del tamaño de la cadena crítica debe ser superado por la duración total asignada a los buffers.

Formula de Calculo:

$$Buffer = 0.5 \sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i)$$

Donde:

n: número de actividades pertenecientes a la Cadena Crítica o a las subcadenas.

i: actividad.

dcPi: duración de la actividad i con protección

dsPi: duración de la actividad i sin protección.

Método del Tercio Critico (TC).

Se basa en la omisión de la duración de las protecciones de las actividades. (Vázquez, Ares, Barrasa 2017).

El dimensionamiento de los amortiguadores está definido por:

- Identificar las actividades que constituyen la cadena crítica y subcadenas
- Dejar dichas actividades sin el tiempo de protección
- Calcular el tiempo de la cadena crítica o subcadenas sin tener en cuenta el tiempo de protección
- Colocar un tercio de la longitud obtenida.

Formula de Calculo:

$$Buffer = \frac{\sum_{i=1}^n dsP_i}{3}$$

Donde:

n: número de actividades pertenecientes a la Cadena Crítica o a las subcadenas.

i: actividad.

dsPi: duración de la actividad i sin protección.

Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados (ROOT).

Propuesto por Newbold (1998), mide el buffer como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias de tiempos, con y sin protección, para las tareas a lo largo de la cadena. Tukul et al. (2006) se refiere a este método como el método de error de raíz cuadrada.

En esta metodología se tiene en cuenta la variación (σ) conocida en la duración de las actividades para el cálculo del tamaño de los buffers, teniendo en cuenta que la

resta de la duración de las actividades con protección menos las actividades sin protección es aproximadamente dos veces la desviación ($2 * \sigma$), (Iglesias 2005).

Formula de Calculo:

$$Buffer = \sqrt{\sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i)^2}$$

Donde:

n: número de actividades pertenecientes a la Cadena Critica o a las subcadenas.

i: actividad.

dcPi: duración de la actividad i con protección

dsPi: duración de la actividad i sin protección.

A continuación, se muestra los requisitos, ventajas e inconvenientes que los autores Elena Vázquez, Carlos Amiama & Martin Barrasa, encuentran luego de implementar la filosofía TOC en un proyecto piloto.

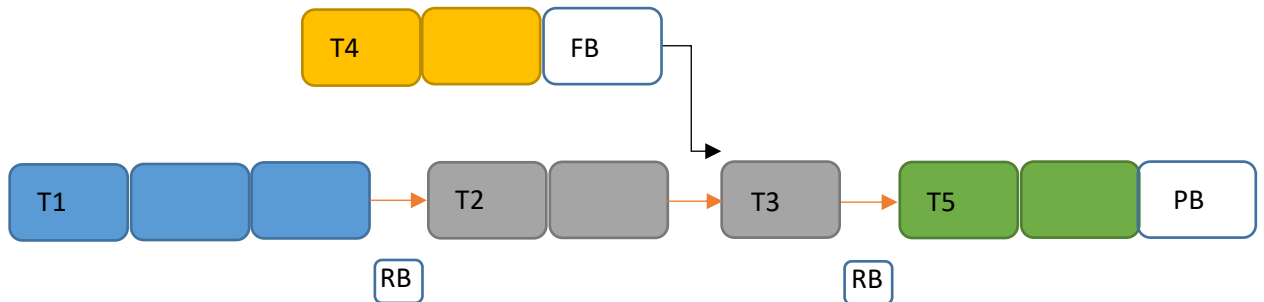
Metodologías dimensionamiento Buffers		
Método ROOT	PRO	<ul style="list-style-type: none"> Este método funciona muy bien para aquellos proyectos que presentan bajas incertidumbres o menor probabilidad de variaciones.
	CONTRA	<ul style="list-style-type: none"> Puede conducir a buffers de tamaño menor al deseado para aquellas cadenas que sean largas. No es un método práctico para aquellos proyectos que pretendan aplicar el CPM desde el inicio de su programación, al tener que estimar dos cronogramas distintos (uno con protección y otro sin protección).
	REQUISITOS	<ul style="list-style-type: none"> El buffer resultante no debe ser inferior al 25% de la duración total de la cadena crítica.

		<ul style="list-style-type: none"> • Para la utilización de esta técnica es necesario disponer de los datos de duración de las tareas del proyecto con protección y sin ella.
Método CP	PRO	<ul style="list-style-type: none"> • Se caracteriza por su facilidad y comodidad práctica. • Facilidad de adaptación a todo tipo de proyecto ya que, aunque normalmente se utiliza el porcentaje del 50% sugerido en el método, el procedimiento de cálculo puede irse rectificando en base a la experiencia de la aplicación del método, empleando proporciones menores para proyectos con menor variabilidad y porcentajes mayores para los que presentan una mayor incertidumbre.
	CONTRA	<ul style="list-style-type: none"> • La necesidad de disponer de una primera planificación sobredimensionada para el cálculo de los buffers hace que sea un método inviable para aquellos proyectos que se pretenden planificar desde origen implementando CCPM, ya que la determinación de dos cronogramas distintos (uno con protección y otro sin protección) disminuye su sencillez de aplicación.
	REQUISITOS	<ul style="list-style-type: none"> • La duración total asignada a los buffers no debe ser inferior al 25% del tamaño de la cadena crítica. • Es necesario conocer tanto la duración con protección como sin protección de la actividad.
Método TC	PRO	<ul style="list-style-type: none"> • Al sólo ser necesario calcular el tiempo de ejecución que se requiere para cada actividad sin ningún tipo de holgura resulta un método muy útil para aquellos proyectos que se planifican desde el origen implementando CPM. • Puesto que de su cálculo se obtiene un buffer del 33% de la duración total de la cadena crítica, este método

		funciona muy bien para aquellos proyectos que presentan un alto grado de variabilidad.
	CONTRA	<ul style="list-style-type: none"> Al ser un algoritmo lineal, la dimensión de los márgenes de seguridad añadidos depende del tamaño de la cadena de tareas, por lo que, en proyectos de gran duración, se obtendrían, buffers probablemente excesivos.
	REQUISITOS	<ul style="list-style-type: none"> Precisa conocer de la forma más exacta posible la duración sin protección de cada una de las actividades del proyecto.

En la figura 6 se muestra un ejemplo simple donde se ubica cada uno de los diferentes buffers según su función en la cadena crítica y en la subcadena.

Figura 6. Ejemplo de cronograma aplicando la teoría de restricciones.



T: Tareas (cada cuadro representa una semana de duración)

PB: Buffer del proyecto.

FB: Buffer de alimentación.

RB: Buffer de recursos.

→ Cadena critica

→ Subcadena

■ Recurso 1

■ Recurso 2

■ Recurso 3

■ Recurso 4

□ Buffer

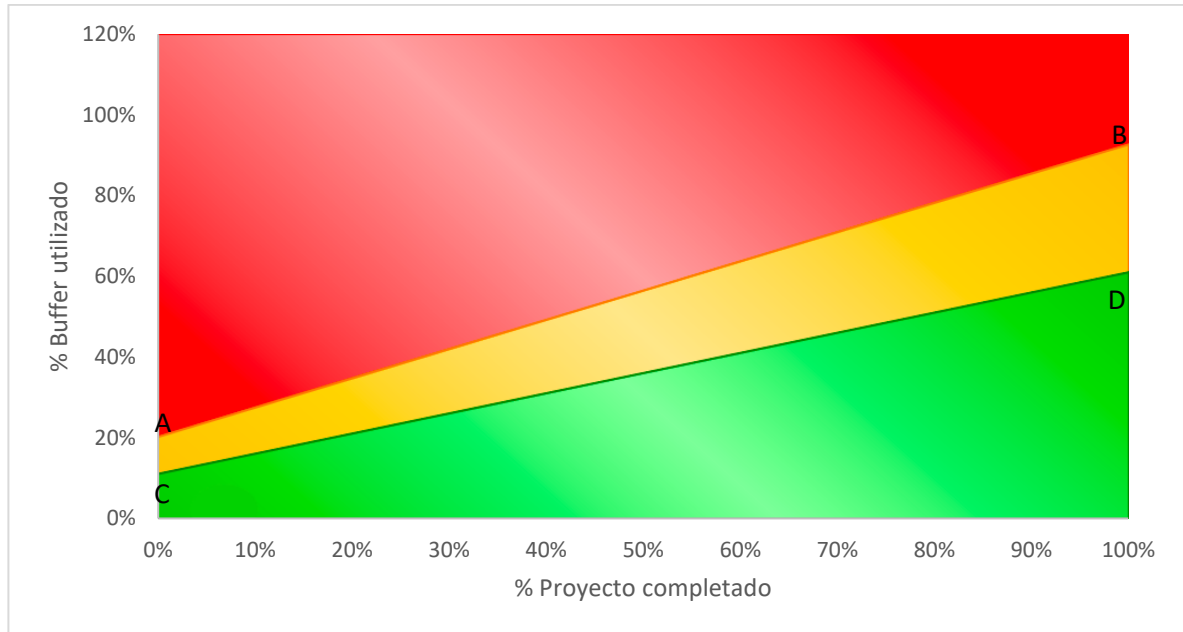
Fuente:

Elaboración propia.

CONTROL Y SEGUIMIENTO DE PROYECTOS CON CCPM.

Para el seguimiento, control y gestión de los proyectos realizados bajo los términos de la CCPM se utiliza la hoja de control que se denomina Fever Chart o gráfico de fiebre. El control del proyecto se centra en el porcentaje del proyecto completado ubicado en el eje "x" versus el porcentaje del buffer utilizado ubicado en el eje "y"; el Fever Chart se divide en 3 regiones diferentes para el control de los proyectos, donde cada color representa una alerta temprana para tomar una acción o medida y así poder finalizar el proyecto en el tiempo estimado.

Figura 7. Representación diagrama de fiebre.



Fuente:

Elaboración propia.

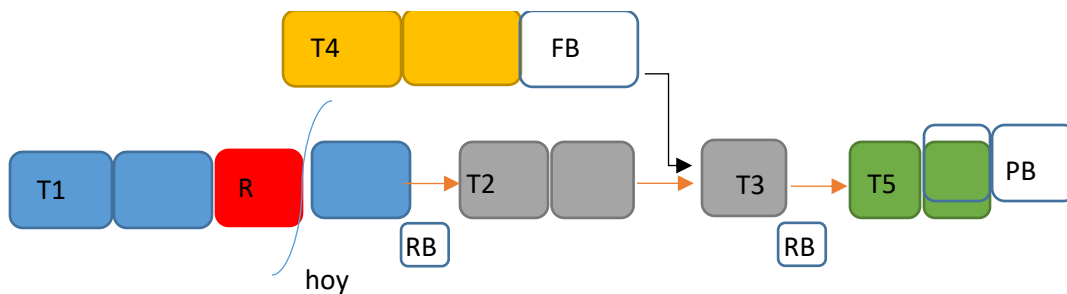
Los puntos A, B, C y D están ubicados de forma que definan las distintas regiones mostradas en la figura 5. el punto B debe ubicarse por debajo del punto 100% del eje vertical, ya que si hay un retraso de último minuto se pueda tomar una acción y así llegar a la fecha de entrega, en este caso se ubica en el 90%; el punto A debe estar por encima del 0% para que se pueda adaptar a retrasos iniciales, teniendo en cuenta que no debe ser tan alto como dejar desapercibidos retrasos iniciales graves, en este caso se ubica en el 20%; estos dos puntos definen la región de color rojo que implica la necesidad de una atención seria por parte de los constructores, la región amarilla indica un llamado de atención por parte del controlador o el personal encargado del seguimiento de la obra, al indicar que el buffer se esta consumiendo en gran parte y el avance no es tan significativo.

Los puntos por debajo de C y D le indican al constructor que tiene una posibilidad muy alta de terminar a tiempo el proyecto. La ubicación del punto D depende de cada planificador, si una de las principales preocupaciones es la tardanza, este

punto debe estar cercano a B, para tomar a tiempo acciones que mitiguen el retraso del proyecto, en este caso se ubica en el 60%; el punto A se puede ubicar entre el 0% y el 10%, teniendo en cuenta algunos imprevistos leves que pueden llegar a aparecer al inicio de la obra, este punto fue ubicado en el 10%.

Para entender cómo se calcula el porcentaje del proyecto completado y el porcentaje del buffer utilizado se toma como referencia la figura 6, donde se muestra la distribución de los buffers.

Figura 8. Ejemplo de cronograma aplicando la teoría de restricciones, con atraso.



R: Retraso

Fuente:

Elaboración propia.

En este caso práctico, cada uno de los cuadros indica la duración por semana de las actividades, y cada color es un recurso diferente; se toma como ejemplo que en la actividad 1 de la cadena crítica a la fecha (hoy) tiene una semana de atraso, ubicando el color rojo y la letra R como representación, adicionándole una semana a la cadena crítica y utilizando una semana del buffer del proyecto, se procede a calcular los porcentajes utilizados en el diagrama de fiebre para el seguimiento del proyecto.

$$\% \text{ proyecto completado} = \frac{\text{hoy}}{\text{Duracion actual cadena critica}}$$

$$\% \text{ buffer utilizado} = \frac{\text{Duracion actual cadena critica} - \text{Duracion cadena critica}}{\text{Duracion Buffer del proyecto}}$$

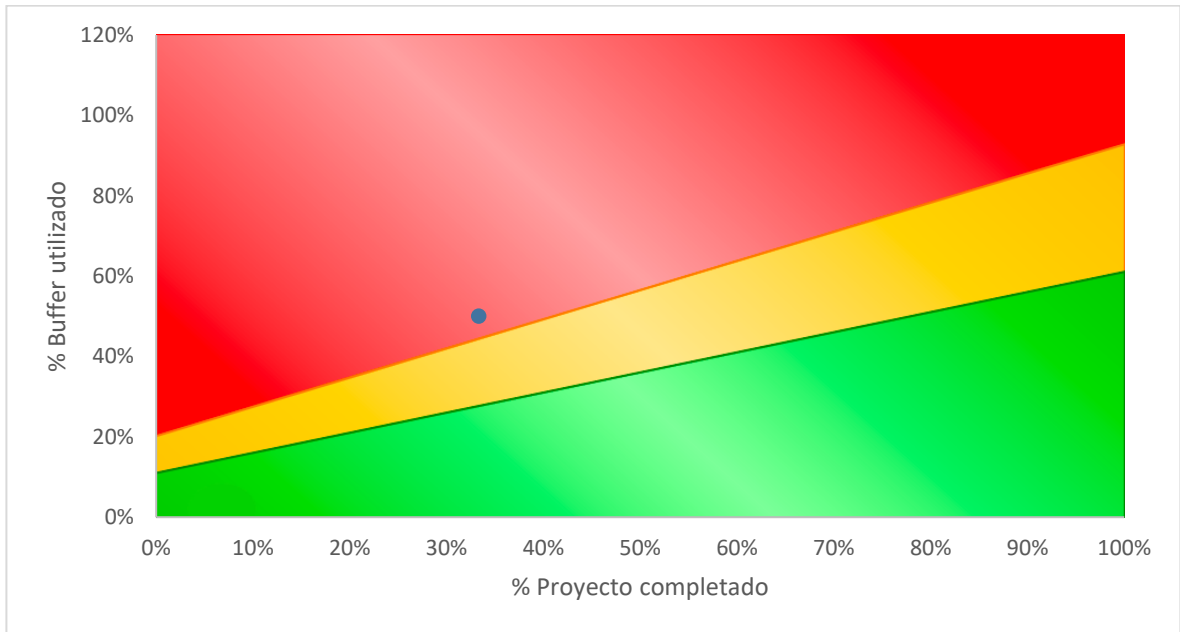
(Hegde, Jain & Das 2021)

$$\% \text{ proyecto completado} = \frac{3}{9} = 0.33 = 33.33\%$$

$$\% \text{ buffer utilizado} = \frac{9 - 8}{2} = \frac{1}{2} = 0.5 = 50\%$$

Se ubican los valores dados en la gráfica, dando un punto en la región de color rojo, lo cual implicaría para las personas que están realizando el proyecto una atención seria en las actividades de la cadena critica para lograr alcanzar a terminar en la fecha límite.

Figura 9. Representación del seguimiento del ejemplo de la figura 5 en el diagrama de fiebre.



Fuente:

Elaboración propia.

ESTADO DEL ARTE.

Uno de los sectores industriales en los que TOC ha sido utilizado es el sector automotriz donde ayuda a complementar diferentes metodologías utilizadas como “Activity-based costing (ABC)” el cual es un método de cálculo de costos que primero asigna costos generales a las actividades y luego a los productos, pedidos o clientes, en función del consumo de las diferentes actividades (Kaplan & Cooper, 1998; Gupta & Kline, 2008); tanto ABC como TOC se complementan entre sí para superar algunas de las fallas del cálculo de costos para mejorar la toma de decisiones gerenciales (Sheu, Chen, & Kovar, 2003). Los proponentes de esta metodología destacan dos principales objetivos (Holmen, 1995)

1. Proporcionar información detallada que describa el rango, el costo y el consumo de las actividades en toda la organización.
2. Proporcionar información precisa a los gerentes para mejorar sus decisiones.

ABC es un proceso de dos etapas que primero asocia los costos con las actividades individuales y luego identifica una medida del uso de la actividad para cada actividad, denominada generador de costos.

Al ser una filosofía centrada en encontrar las restricciones de los sistemas y realizar acciones para superarlas, diferentes investigadores han realizado publicaciones sobre la aplicación de esta filosofía, en diferentes sectores. Breen, Burton-Houle & Aron (2002) realizaron estudios sobre el uso de TOC en organizaciones de salud, donde aplican y explican los cinco pasos en el proceso de mejora de la calidad de TOC con ejemplos:

1. Identificar la restricción del sistema: en este caso ponen como ejemplo el número de cuartos para examinar, los médicos, enfermeras o auxiliares; donde en muchas de las organizaciones de la salud, la restricción es el personal de apoyo. Cuando es el momento de recortar los costos, prefieren realizar el recorte al personal de tareas como mensajería, recepcionista, antes que los médicos el resultado es que se gastan mas tiempo haciendo trabajos de oficina y menos tiempo atendiendo pacientes.
2. Decidir como explotar la restricción: uno de los ejemplos es, si la restricción son los cuartos para examinar, la pregunta debe ser ¿Cómo se están utilizando estos cuartos para maximizar la productividad?
3. Subordinar todo lo demás a la decisión anterior: para poder subordinar todo lo demás es importante tener en cuenta como se están agendando las citas

de los pacientes, ¿Cómo se está realizando la entrada de dichos pacientes, como se deberían de utilizar estos cuartos?

4. Elevar la restricción del sistema: en este caso contratar más personal.
5. Si en los pasos pasados la restricción se rompe, se retorna al paso 1: tener en cuenta que la solución óptima tiende a deteriorarse con el tiempo, mientras va cambiando el entorno. TOC es un proceso de mejora continua.

Los autores concluyen en su investigación que TOC ofrece un método lógico y riguroso para analizar y mejorar el desempeño de una empresa de atención médica y que parte de su poder reside en el hecho de que gran parte de él es de “sentido común”.

Otro de los autores enfocados en dicha área son Bauer, Vargas, Sellitto, Cásseres & Veccaro (2019) donde identifican y explican sobre la implementación de TP-TOC método para identificar y mejorar las restricciones y poder mejorar el desempeño de los sistemas de servicios de salud, enfocándose en la calidad de estos servicios. La implementación de TP-TOC consiste en el uso del diagrama de causa y efecto para resolver problemas en organizaciones, las herramientas recomendadas para dicha implementación son:

- El árbol de la realidad actual (Current Reality Tree CRT), el cual permite a los gerentes trabajar desde los efectos (situados en la parte superior) hasta las causas (situadas en la parte inferior) en una lógica que va desde arriba hacia abajo
- El árbol de la realidad futura (Future Reality Tree FRT) permite identificar los cambios requeridos de las acciones, así como prevenir problemas que puedan surgir de la implementación de la solución.
- El árbol de requisitos previos (Prerequisite Tree PRT) el cual define metas intermedias que superan los obstáculos potenciales y posibilita el desarrollo de un plan de acción para lograr el FRT.
- El árbol de transición (Transition Tree TT) identifica las acciones necesarias para lograr las metas establecidas
- El diagrama de la nube de evaporación (Evaporating Cloud Diagram EC) permite verificar los supuestos verificados con el conflicto o problema central y comprende el por qué no se resolvió dicho problema.

Al finalizar concluyen que la implementación de TP-TOC en el caso de estudio fue relevante para el personal y gerentes del hospital ya que las herramientas operativas permitieron dar atención y combinar las opiniones de los involucrados, dando así, de manera constructiva, la realidad actual del hospital y sus problemas asociados a la insatisfacción de los pacientes.

En el sector de la construcción igualmente ha sido aplicado TOC con éxito en diferentes proyectos de infraestructura. En mayo de 1998 se expuso en una conferencia organizada por el Goldratt Institute, el resultado obtenido por la aplicación de la filosofía TOC en proyectos de construcción, liderada por Philip Baylis de Balfour Beatty Civil Engineering Ltd, donde se presentaron aplicaciones sobre el uso de esta en diferentes obras donde la teoría de las restricciones se había utilizado con éxito. El primer proyecto en el que fueron aplicados estos conceptos se entregó con dos semanas de anticipación, con un 99.5% de todas las actividades finalizadas, por lo cual concluyó que es una herramienta esencial para ayudar en la entrega de un proyecto exitoso. (Rand 2000).

Newbold (1998) propone siete pasos para poder aplicar la metodología de CCS en un cronograma de obra, estos pasos son:

1. Establecer claramente los objetivos del Proyecto y del plan del Proyecto. Es necesario construir un presupuesto del Proyecto y una fecha objetiva de finalización de acuerdo con los requisitos del cliente.
2. Determinar las necesidades que deben satisfacerse y las actividades necesarias para satisfacerlas. El método de estructura de desglose del trabajo (WBS) es un medio adecuado para establecer claramente todas las actividades requeridas.
3. Determinar la relación lógica entre las actividades y necesidades. Las cuales se dividen en 4 relaciones: inicio a inicio, inicio a fin, fin a inicio y fin a fin, se emplean generalmente para representar la secuencia de ejecución de la actividad.
4. Estimar los requisitos de recursos, la duración de la actividad y los costos. Se requiere una base de datos de recursos para construirla y así recopilar la capacidad del recurso. Los datos históricos y la información más reciente del mercado, es un estimador del cual se puede recopilar información para cumplir con precisión y rapidez esta tarea.
5. Calcular el cronograma de la cadena crítica, incluidos los buffers. De acuerdo con la metodología de CCS, se construiría un cronograma de proyecto basado en la cadena crítica.
6. Evaluar el plan de acuerdo con el presupuesto y la restricción de tiempo. Debido a que los resultados de la programación son la línea base para la ejecución, es necesario compararlos con los objetivos aclarados en el paso 1.
7. Si es necesario, regresar a un paso anterior y revisar el plan. Este paso da un concepto de mejora continua que es base para cumplir con los requisitos del cliente.

Leach (1999) describe el método CCPM (gestión de proyectos por cadena crítica) y explica que se utilizan tres herramientas teóricas para mejorar el desempeño del proyecto. Aplica la teoría para eliminar seis efectos específicos del proyecto que conducen a sobrecostos en el cronograma del proyecto, es decir TOC identifica los seis elementos como efectos, en lugar de causas, porque tiene causas subyacentes.

1. Teoría de las restricciones: se resume en, cualquier sistema debe tener por lo menos una restricción, de lo contrario, su producción aumentaría de manera infinita o iría a cero.
2. Variación de causa común: los proyectos tienen una variación de causa común en el tiempo de ejecución de las actividades, esta variación representa incertidumbre en el tiempo de ejecución de cada actividad; se dividen en
 - Variación de causa común: una causa que es inherente al sistema
 - Variación de causa especial: causa que se especifica de algún grupo de trabajadores, maquinaria o producción. (Deming, 1989)
3. Leyes estadísticas que rigen la variación por causa común: se puede proteger una cadena de actividades al mismo nivel de probabilidad con mucho menos tiempo total de contingencia del que podemos proteger cada actividad de forma individual.

Los efectos que TOC identifica son:

1. Estimaciones de duraciones de actividades excesiva: se incluye el tiempo de contingencia dentro de cada actividad
2. Poca variación positiva de la actividad real: el comportamiento de desempeño de la actividad conduce a poca variación positiva.
3. No transmitir la variación positiva
4. Retraso del proyecto por la combinación de rutas de actividades: todas las rutas de actividades deben fusionarse con la ruta crítica al final del proyecto.
5. Multitarea: Goldratt (1984) demostró como el enfoque en la eficiencia local podría dañar el desempeño general de un sistema.
6. Pérdida de enfoque: varios aspectos de la planificación dificultan que los encargados de la ejecución del proyecto sepan donde concentrarse para garantizar un correcto desempeño en la obra; estos serían:
 - Horario de inicio temprano, que permite que todas las rutas de actividades comiencen al mismo tiempo.

- Cambiar la ruta crítica durante la ejecución del proyecto.
- Utilizar exclusivamente el valor ganado para el control del proyecto, ya que el valor ganado no discrimina entre las actividades que afectan la ruta crítica y las que no.
- Excesivas acciones de control.

Uno de los autores que ha realizado investigaciones sobre este tema es Yang (2003) aplicando la teoría de restricciones en la programación de obra ilustrado en el libro “System-based Visión for Strategic and Creative Design”, donde en el capítulo “Applying the theory of constraints to construction scheduling” propone implementar la TOC en los cronogramas de obra, implementando el método de programación de cadena crítica, el cual agrega que la diferencia básica entre el método de la ruta crítica (critical path method) CPM y la CCS depende del tratamiento de las restricciones de recursos en la determinación de actividades críticas y en el uso y colocación de buffers, en una red de programación. Con el método CPM los “seguros” o tiempos de protección se extienden entre todas las actividades, con el método CCS se agregan buffers o amortiguadores que se utilizan para proteger la fecha objetiva del proyecto manteniendo el enfoque en las actividades críticas.

En Hong Kong Ellen Lau y Janet Jiahui Kong (2006), realizan un estudio donde enviaron alrededor de 120 cuestionarios al gobierno y empresas contratistas, solicitando a los encuestados indicar cualquiera de las limitaciones que han encontrado en los proyectos de construcción donde han trabajado, igualmente se pidió utilizar una escala de calificación del 1 al 10 el nivel de impacto de las restricciones; de estas encuestas se recibieron 30 respuestas, las cuales obtuvieron como resultado:

1. Restricciones económicas: ocurren en la asignación del dinero, es decir, si el dinero no se asigna de manera efectiva, afectara el progreso del proyecto; lo cual altera la calidad y el desempeño
2. Restricciones legales: estas existen ya que hay muchas regulaciones que rigen los proyectos, las cuales están relacionadas con la ley laboral, las normas de seguridad y el plan de supervisión. Estas restricciones pueden afectar el cronograma y generar retrasos.
3. Restricciones ambientales: en la etapa de planificación y diseño del proyecto, es necesario acudir a la entidad encargada de los permisos ambientales, esto lleva un tiempo y si la respuesta no se recibe en el lapso esperado todo el proyecto se retrasará o no se podrá ejecutar.

4. Restricciones técnicas: como los espacios de almacenamiento, el transporte, las obras temporales, la coordinación de obras de servicios; los cuales exigen una coordinación y colaboración de múltiples partes en términos de diseño y construcción. Se reconocen más fácilmente desde el principio y en la etapa de diseño, pero no significa que se puedan superar todas estas.
5. Restricciones sociales: estas provienen de la gente, las suposiciones inadecuadas o el mal juicio que surgen de las limitaciones o restricciones humanas puede llevar a un desastre; estas pueden aparecer de tres formas:
 - Resistencia humana
 - Restricciones emocionales
 - Propiedad del problema.

Al obtener estas cinco restricciones en las obras de construcción evalúan el nivel de impacto de estas, siendo 1 de menor impacto y 10 de mayor impacto, y concluyen:

Tabla 3. Nivel de impacto de las restricciones en proyectos de construcción

Restricciones	Nivel de impacto
Restricciones legales	7.2
Restricciones económicas	7
Restricciones ambientales	7
Restricciones técnicas	4.75
Restricciones sociales	5.4

Fuente:

Lau & Jiahui, 2006.

A medida que se van realizando diferentes investigaciones y proyectos aplicando la teoría de restricciones a la planificación de los proyectos, diferentes autores proponen alternativas que mejoran el método. Entre estos se encuentra Dr. Luong Duc Long de la universidad Tecnológica de Ciudad Ho Chi (HCMUT) y el Dr. Ario Ohsato de la universidad tecnológica de Nagaoka, (2008) los cuales desarrollan un método difuso de cadena crítica para la programación de proyectos bajo recursos con restricciones e incertidumbres. El método consiste en desarrollar un programa determinista deseable bajo restricciones de recursos y agregar un buffer (PB) al final del esquema para lidiar con las incertidumbres. Durante la ejecución del proyecto, el método propuesto se enfoca en el nivel de penetración del buffer en el proyecto,

y actualiza dinámicamente el cronograma para proporcionar un cronograma más preciso para el progreso real. El uso de buffers hace que el método sea similar a la gestión de proyectos de cadena crítica (Critical Chain Project Management (CCPM)), aunque no se usan buffers de alimentación. El método propuesto es útil tanto para la ejecución del proyecto como para la planificación.

El dimensionamiento de los buffers es uno de los temas más importantes en la aplicación de la teoría de restricciones en la planificación de obras. Los investigadores Li Bie, Nangang Cui y Xiaoming Zhang (2012) analizan los efectos de la dependencia entre las actividades en los desempeños de duración del proyecto y así se logra introducir un método para determinar los tamaños de los buffers con el supuesto de dependencia entre actividades. Específicamente, dos definiciones que reflejan la dependencia, que son el grado de dependencia (Dependence Degree, DD) el cual se refleja como la relación entre el número de actividades relacionadas con el riesgo y el número total de actividades en la cadena crítica o el camino más largo de cada cadena de alimentación y el factor de dependencia (Dependence Factor, DF) se refleja como el parámetro del nivel medio de dependencia, que se refleja calculando la proporción de incertidumbre de duración de una actividad explicada por el factor de riesgo. Estos se integran en la formulación del enfoque de dimensionamiento del buffer y es comparado con los diferentes métodos probados por otros investigadores como el método del error de raíz cuadrada, el procedimiento adaptativo con recursos y el procedimiento de adaptación con densidad. Los resultados indican que los métodos con suposición de independencia pueden subestimar el tamaño del buffer, mientras que el método sugerido en dicha investigación puede proporcionar una mejor protección en tales circunstancias.

Los enfoques de dimensionamiento del buffer más actuales suponen que las duraciones de las actividades del proyecto son independientes, sin embargo, esta suposición no es realista debido al impacto en las actividades derivadas (Bie, Cui y Zhang 2012). Otros autores con producción académico sobre el tema son: Leng Kaijun, Shi Wen, Hu Xuejun y Pan Lin. En el año 2017 presentaron un nuevo método de dimensionamiento del buffer que tiene en cuenta el riesgo de duración de la actividad, así como el riesgo de restricción de múltiples recursos bajo incertidumbre. En primer lugar, se identifican los factores de riesgo claves y el riesgo de duración de la actividad, se evalúa de manera efectiva utilizando “the BayesianNetwork” o red Bayes, que es un modelo gráfico probabilístico que representa un conjunto de variables y sus dependencias condicionales a través de un gráfico acíclico dirigido. En segundo lugar, el riesgo de la restricción de recursos se determina adecuadamente mediante el uso de la red de flujo de recurso. Los métodos de

dimensionamiento del buffer de áreas razonables se desarrollan para la construcción de un plan estable de programación de la cadena crítica.

Al comparar el método descrito anteriormente (método de dimensionamiento del buffer de cadena crítica) contra los diferentes métodos publicados por otros autores, la originalidad radica principalmente en:

1. Aplicando la red Bayesiana para analizar y evaluar los riesgos de duración de la actividad, establece un sistema de medición adecuado para confirmar el tiempo de planificación de la actividad y el tiempo de seguridad, y así proporcionar una base cuantitativa para el dimensionamiento del buffer, basándose en los riesgos de las duraciones.
2. Evaluar los límites de múltiples recursos de los proyectos apuntando a la relación de red de flujo de recursos de planes de proyectos específicos, combinando con las demandas de actividades de recursos para integrar y estimar los riesgos de restricciones de estos.

En el sector de la construcción donde normalmente el control y seguimiento de la obra se realiza por las metodologías conocidas como PERT (técnica de revisión y evaluación de programa) el cual hace uso de matemáticas simples para llegar a una distribución de probabilidad para las fechas de finalización de los hitos del proyecto, (Aziz, 2013) y CPM (método de la ruta crítica), es normal encontrar retrasos en las obras de construcción, Goldratt argumenta que la razón principal por la que pasa esto, se debe al mal uso del tiempo de seguridad creado dentro de los tiempos estimados para cada actividad. El primer requisito para poder aplicar TOC en el control de un proyecto de construcción es asegurarse de que se realicen los preparativos para iniciar las actividades cuando se vayan a ejecutar (Rand 2000); para poder informarle al constructor o a la persona encargada del seguimiento de la obra sobre el cambio de recurso entre una actividad y otra, se implementan los buffers de recursos utilizados en el método de la cadena crítica (critical chain scheduling CCS) el cual se deriva de la teoría de restricciones.

En el año 2015 Vazquez Garcia, Amiama Ares & Barrasa Rioja concluyen que la cadena crítica es la metodología más completa y avanzada que las empresas pueden implementar en la gestión de proyectos y procesos productivos en el día de hoy, ya que les permite conseguir resultados directos, visibles y efectivos; en el caso de las obras la aplicación del CCPM facilitaría dirigir las obras con suficientes herramientas de control y seguimiento para conocer el estado actual de las actividades críticas y lograr la finalización de las mismas en los tiempos planeados, teniendo en cuenta que para lograr satisfactoriamente la implementación de dicha

metodología, los agentes intervinientes deben romper con los hábitos e inercias de los métodos tradicionales.

Un año después estos autores realizan una investigación sobre la aplicación de dicho método a un proyecto de ingeniería civil, donde se obtiene como resultado una reducción del tiempo de ejecución en el cronograma del proyecto, lo cual en el momento de ofrecer plazos más reducidos a igualdad de recursos supone una ventaja competitiva, al igual que el uso y la distribución correcta de las protecciones conllevan a un aprovechamiento efectivo de las mismas, de forma que se obtiene una mayor protección real con una cantidad menor de tiempo de seguridad. La aplicación del método CCPM en la construcción supone una herramienta efectiva para poder finalizar los proyectos de forma más rápida, obtener proyectos más organizados, lo cual da una reducción de los plazos y una mejora en la planificación control de obra y ejecución.

Un caso de estudio donde se aplica TOC lo realiza Krystyna Araszkievicz (2017) donde la programación de proyectos de construcción implementados en un entorno multiproyecto con el uso de la metodología de la cadena crítica fue analizado bajo un estudio del programa de construcción de infraestructura de marinas, cuyo objetivo era crear una red de puertos y marinas funcionalmente vinculados; el autor concluye que la planificación basada en el CCPM (Critical Chain Project Management) permitirá una programación flexible de proyectos individuales y su movimiento dentro de los límites designados por las restricciones de capacidad. De esta forma se recomienda que para verificar la efectividad del uso de CCPM en la gestión de múltiples proyectos de construcción, se debe realizar un análisis más detallado, principalmente desde la perspectiva de la cartera de proyectos realizados dentro de un tiempo especificado por la empresa constructora.

Otra investigación donde fue aplicado la teoría de restricciones corresponde a un proyecto de construcción de una autopista, la realizada por Debasis Sarkar, K. N. Jhan & Shraddha Patel (2018), donde el proyecto mostró resultados positivos al aplicar TOC, ya que, gracias a esta pueden gestionar y manejar de manera eficiente las limitaciones relativas a recursos, tales como, mano de obra, equipo y materiales. Al evitar las limitaciones como la escasez presupuestal, la escasez de mano de obra y la escasez de equipos se minimizó la posibilidad de retrasos o fracaso del proyecto.

Según el análisis que se realizó para un tramo de 1,5 km del proyecto, el buffer del proyecto de 1,53 días y los buffers de alimentación de 0,31 y 0,62 días reducirían el impacto de las incertidumbres en la ruta crítica la cual tenía una duración de 29 días; luego del proceso de nivelación utilizando la TOC la mano de obra requerida tuvo

una reducción del 10,53%, por otro lado, el número de equipos requeridos era de 17 y se redujo a 12, una reducción del 29,41%. Por consiguiente, la aplicación de la TOC, ayudó en el desarrollo de estrategias de mitigación para permitir que los proyectos se completen en el tiempo estipulado y no se generen sobre costos.

Unas de las últimas investigaciones realizada por Shakib Zohrehvandi y Mohammad (2019) investigan sobre gestión y optimización de cronogramas, donde tienen como fin presentar un modelo eficiente para el dimensionamiento del buffer en los proyectos, tomando en cuenta las fallas de los otros modelos y el análisis de efectos (FMEA) "Failure Mode and Effects Analysis", el cual es un procedimiento de análisis de fallos potenciales en un sistema de clasificación determinados por la gravedad o por el efecto de los fallos en el sistema, para alcanzar un cronograma más realista. En esta investigación los autores optan por introducir un nuevo algoritmo híbrido el cual es una combinación del algoritmo tradicional de dimensionamiento del buffer y el método de evaluación de riesgos ampliamente utilizado conocido como FMEA con el objetivo de hacer que el cronograma del proyecto sea más realista.

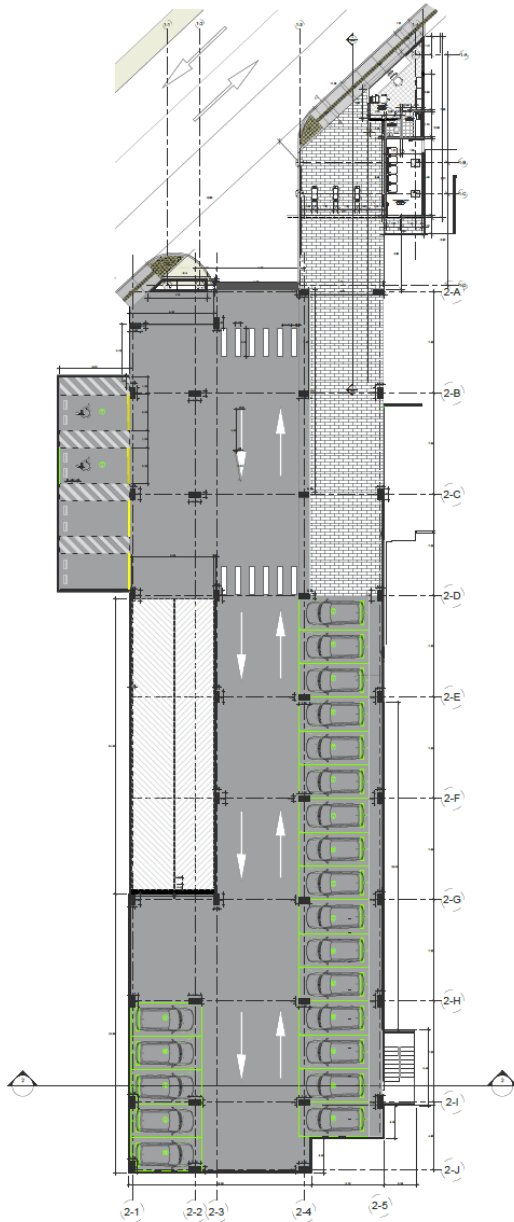
El resultado obtenido en la investigación al aplicar el nuevo algoritmo híbrido fue positivo ya que el proyecto fue completado antes de lo previsto en el cronograma, con un 37% menos de la duración inicial estimada, la cual era de 142 días; el proyecto fue completado en 103 días.

RESULTADOS.

SELECCIÓN DEL PROYECTO PILOTO.

El Tecnológico de Antioquia – institución universitaria, institución pública de educación superior, atiende el desarrollo de proyectos internos por medio de la unidad de Infraestructura adscrita a la dependencia de planeación, de la cual hace parte el investigador. En esta área se desarrollan diferentes proyectos de construcción tanto dentro como afuera de la universidad, los cuales se encuentran en ejecución o en proceso de licitación. Como criterio de selección, se buscó un proyecto que por fecha de ejecución se desarrollara al mismo tiempo que esta investigación. Se selecciona el proyecto de construcción denominado, primera fase de la primera etapa del campus Aburra sur, ubicado en el municipio de Itagüí, el cual consta de un bloque de parqueaderos de dos niveles, cada uno de 1107 metros cuadrados y un sótano de 355 metros cuadrados, con altura libre entre pisos de 3 metros, acompañado por la portería que cuenta con un solo nivel de altura 5.6 metros y un área en planta de 111 metros cuadrados; el proyecto es diseñado en sistema aporticado y su duración es de cuatro (4) meses.

Figura 10. Planta primer nivel proyecto primera fase primera etapa del campus Aburra sur.



Fuente:

Planimetría realizada por la universidad Nacional.

Figura 11. Render proyecto sede aburra sur Tecnológico de Antioquia.



Fuente:

Elaboración propia.

PLANIFICACIÓN A PARTIR DE LA METODOLOGÍA CPM.

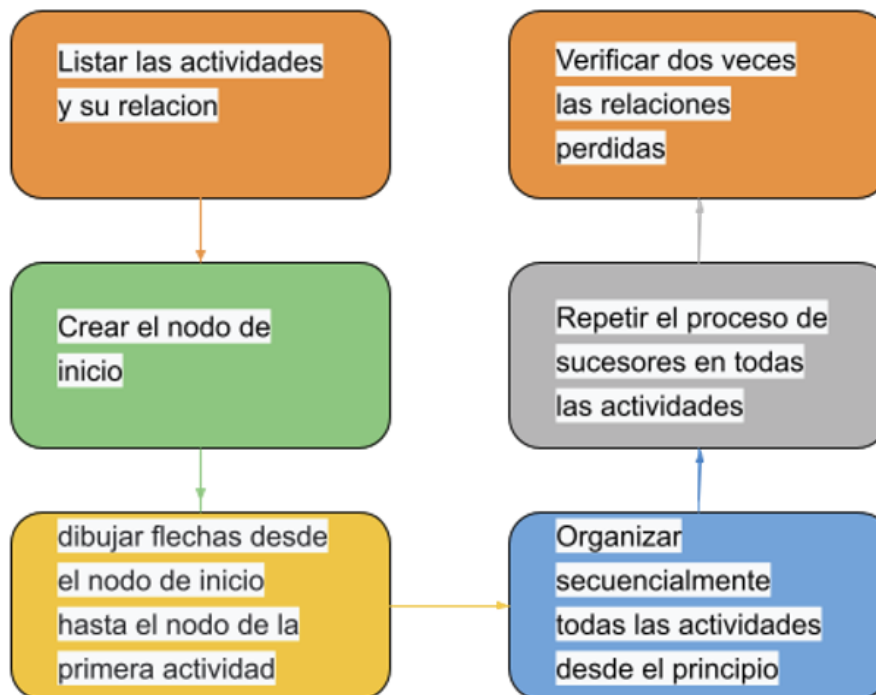
El plazo inicial del proyecto de portería y parqueaderos para su ejecución fue considerado en 124 días de acuerdo con el método tradicional de CPM. Dicha metodología permite estimar el tiempo más corto en el que es posible finalizar un proyecto, el cual es un algoritmo que se utiliza para el cálculo de los plazos y tiempos en la planificación de proyectos. En la metodología CPM las actividades que conforman la ruta crítica son las que determinan la duración total del proyecto; esta utiliza tiempos estimados y consiste en:

- 1 fase.
 - Dividir el Proyecto en las actividades necesarias para su ejecución.
 - Determinar las relaciones entre dichas actividades.

- Cada actividad debe tener un evento para marcar el comienzo, es decir la finalización de a actividad anterior (Actividades sucesoras y predecesoras).
- 2 fase.
 - Estimar el tiempo de duración de cada actividad.
 - Determinar la fecha de inicio más temprana posible, la fecha de finalización más temprana posible.
- 3 fase
 - Estimar la relación de tiempo-costos.
 - Establecer variaciones del calendario
 - Determinar el mejor balance entre tiempo-costos.
 - Inicio normal: tiempo normal, menor costo.
 - Inicio “rápido”: menor tiempo, mayor costo.

El enfoque del método de la ruta crítica se puede resumir con la ayuda de la siguiente figura.

Figura 12. Enfoque CPM

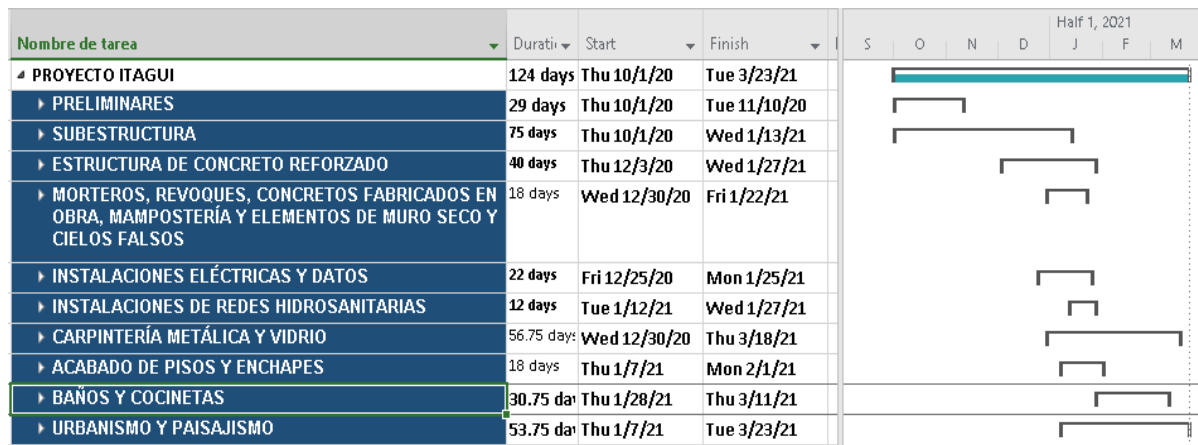


Fuente:

Santiago & Magallon, 2009.

Con la aplicación de estas tres fases es posible realizar un diagrama para representar de forma gráfica el orden en el cual se realizarán las actividades, así mismo, donde se muestren en cada una de las actividades sus sucesoras y predecesoras; en el caso del proyecto piloto esta información se representa en el siguiente diagrama de Gantt, donde se muestran los capítulos del proyecto y sus duraciones, la fecha de inicio de las actividades es el 1 de octubre de 2020 y su culminación el día 23 de marzo de 2021.

Figura 13. Capítulos cronograma de obra y diagrama de Gantt método CPM.



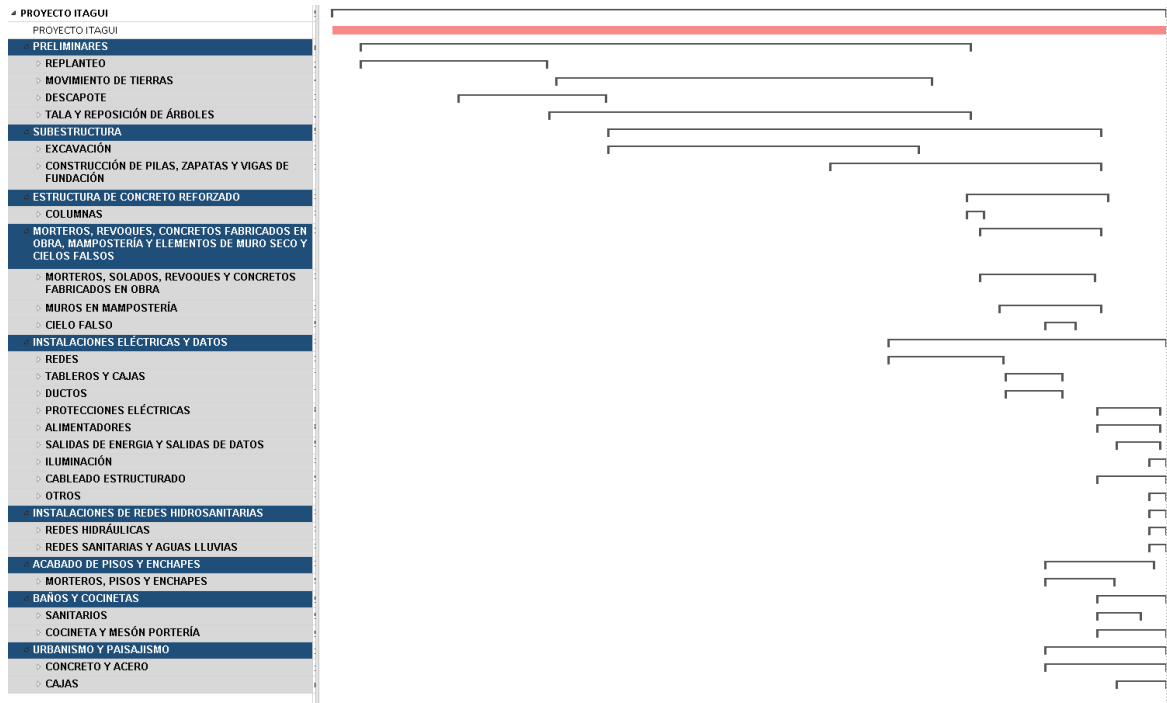
Fuente:

Elaboración consorcio campus aburra, Project.

El método de ruta crítica CPM tiene un enfoque donde considera los siguientes parámetros: 1. Cuáles son las actividades a realizar, 2. La secuencia en la que se van a realizar, 3. Los recursos requeridos para ejecutar dichas actividades, 4. El tiempo requerido para cada una de estas. (Nasution, 1994);

A continuación se muestra la ruta crítica del proyecto, la cual es seleccionada con la ayuda del software MsProject, indicando los capítulos y actividades relacionados con esta.

Figura 14. Ruta crítica proyecto piloto.



Fuente:

Elaboración consorcio campus aburra, Project.

PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO A PARTIR DE LA CADENA CRÍTICA.

TOC aplicada en los cronogramas de obra se basa principalmente en la eliminación de los tiempos de protección que cada actividad tiene en las metodologías tradicionales y del cálculo y aplicación de los buffers en el cronograma que sirven para ayudar a controlar la fecha límite del proyecto, evitando tiempos adicionales en cada actividad.

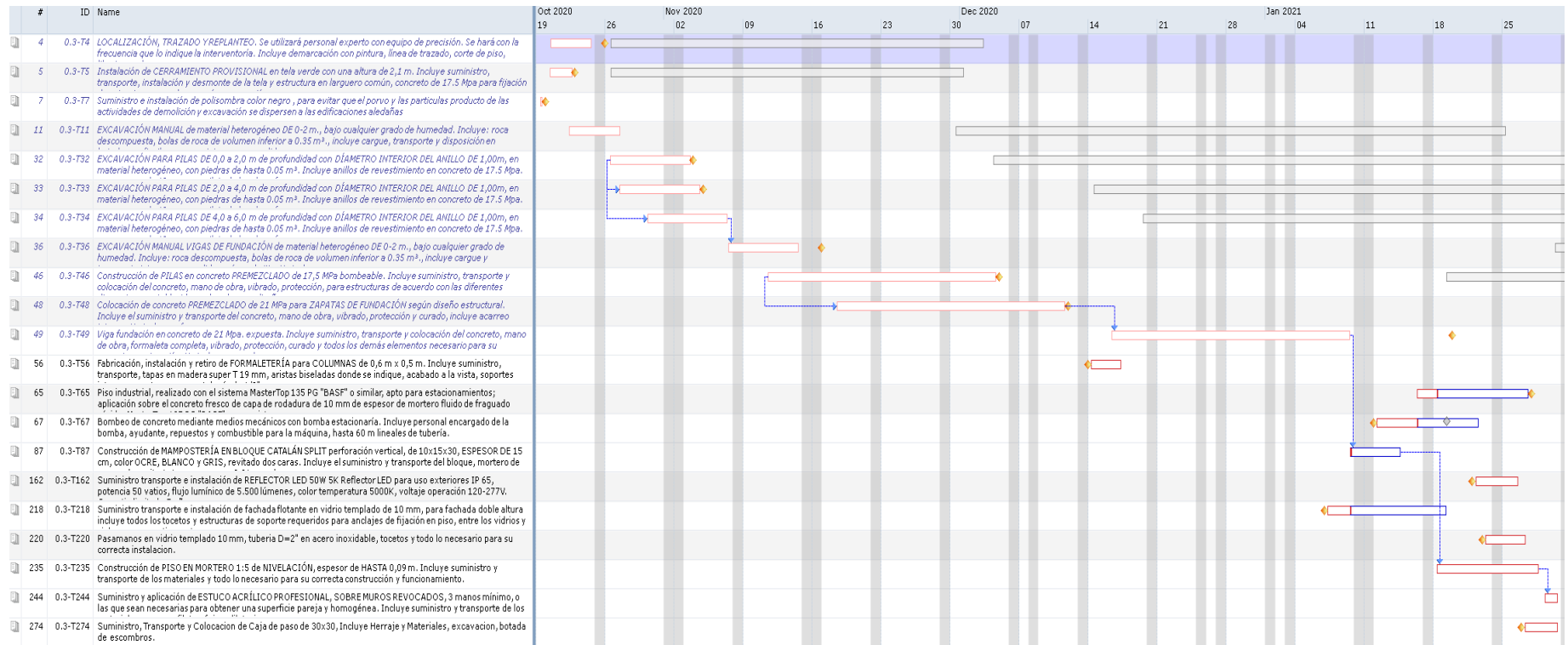
Es de suma importancia en el momento de la planificación con la metodología TOC saber calcular el dimensionamiento de los buffers y poner adecuadamente estos tiempos en el software, ya que esto ayuda a llevar adecuadamente el control y

seguimiento del proyecto y así lograr conocer el estado actual de las actividades críticas.

Otra de las diferencias entre TOC y la metodología tradicional es la aplicación de la cadena crítica, la cual se define como el conjunto de tareas que determinan la duración total del proyecto, pero a diferencia de la ruta crítica, la cadena crítica tiene en cuenta la precedencia y dependencia de recursos; es decir en la cadena crítica se tiene en cuenta las cuadrillas, equipamiento y materiales.

En el proyecto piloto que se evaluó se tomó el cronograma inicial de dicha obra para así poder construir el nuevo cronograma utilizando TOC con la herramienta de la cadena crítica, utilizando el Software Lynx Scheduler, al colocar en cada una de las actividades las fechas límites o de terminación y los recursos para poder realizarlas, obteniendo como resultado una composición de 21 actividades. A continuación, se muestra el diagrama de la cadena crítica realizado con el software, pasando de 124 días, según el modelo de CPM, a 118 días en la cadena crítica.

Figura 15. Diagrama de Gantt con las duraciones de las actividades de la cadena crítica.



Fuente:

elaboración propia, utilizando Lynx Scheduler.

Cada una de las actividades de la cadena crítica se consideran con la duración normal, al utilizar la teoría de restricciones dichas duraciones no deben tener una protección (Goldratt, 1997). La metodología CCPM considera duraciones de actividades reducidas en un 50%, es decir, el nivel de confianza es equivalente a un 50% en la duración promedio de las actividades si tienen una distribución normal (García, 2014). Para poder aplicar correctamente este criterio es necesario experiencia en el campo del cronograma, programación y seguimiento de obra, implicando que las actividades puedan tener una reducción menor o superior al 50%. En el caso del proyecto seleccionado se consultó con las personas encargadas de su construcción y control, tomando como experiencia los proyectos anteriores en los cuales el Tecnológico de Antioquia ha sido el contratante y responsable del control y seguimiento, concluyendo que el tiempo de protección en estas actividades es aproximadamente el 35%, ya que en los proyectos antes ejecutados por parte del contratante se ha podido identificar este valor como el porcentaje de protección en la mayoría de las actividades. A continuación, se muestran las tablas de la cadena crítica y la subcadena donde se especifica el número de ítem de cada actividad con su duración original, la duración sin el tiempo de protección, la diferencia en días de esta duración y esta diferencia al cuadrado para así poder conocer según las tres diferentes metodologías las dimensiones de los buffers.

En las tablas 4 y 5, se deja indicado el tiempo en días con dos cifras decimales ya que las actividades pueden finalizar en el transcurso del día, teniendo en cuenta las horas diarias trabajadas contempladas, en este caso ocho (8) horas.

Para el cálculo del tamaño de cada uno de los buffers se utilizan los datos de las tablas 4 y 5 donde se muestra la cadena crítica y la subcadena al igual que la duración de cada una de las actividades con y sin protección.

Tabla 4. Indica las actividades (expresadas con el número del ítem) de la cadena crítica de la obra piloto con su respectiva duración con y sin tiempos de protección.

CADENA CRITICA					
# Ítem	Actividad	Duración con protección CPM (días)	Duración sin protección TOC (días)	Diferencia	Dif. Al cuadrado
4	LOCALIZACIÓN, TRAZADO Y REPLANTEO.	10.77	7	3.77	14.21
5	Instalación de CERRAMIENTO PROVISIONAL en tela verde con una altura de 2,1 m.	4.62	3	1.62	2.61
7	Suministro e instalación de polisombra color negro.	1.54	1	0.54	0.29
11	EXCAVACIÓN MANUAL de material heterogéneo DE 0-2 m.	7.69	5	2.69	7.25
32	EXCAVACIÓN PARA PILAS DE 0,0 a 2,0 m de profundidad con DIÁMETRO INTERIOR DEL ANILLO DE 1,00m, en material heterogéneo, con piedras de hasta 0.05 m ³ .	12.31	8	4.31	18.56
33	EXCAVACIÓN PARA PILAS DE 2,0 a 4,0 m de profundidad con DIÁMETRO INTERIOR DEL ANILLO DE 1,00m, en material heterogéneo, con piedras de hasta 0.05 m ³ .	12.31	8	4.31	18.56
34	EXCAVACIÓN PARA PILAS DE 4,0 a 6,0 m de profundidad con DIÁMETRO INTERIOR DEL ANILLO DE 1,00m, en material heterogéneo, con piedras de hasta 0.05 m ³ .	10	6.5	3.5	12.25
36	EXCAVACIÓN MANUAL VIGAS DE FUNDACIÓN de material heterogéneo DE 0-2 m.	5	3.25	1.75	3.06

# Ítem	Actividad	Duración con protección CPM (días)	Duración sin protección TOC (días)	Diferencia	Dif. Al cuadrado
46	Construcción de PILAS en concreto PREMEZCLADO de 17,5 MPa bombeable.	7.69	5	2.69	7.25
48	Colocación de concreto PREMEZCLADO de 21 MPa para ZAPATAS DE FUNDACIÓN.	30	19.5	10.5	110.25
49	Viga fundación en concreto de 21 Mpa. expuesta.	30	19.5	10.5	110.25
56	Fabricación, instalación y retiro de FORMALETERÍA para COLUMNAS de 0,6 m x 0,5 m.	5.08	3.3	1.78	3.16
65	Piso industrial, realizado con el sistema MasterTop 135 PG "BASF" o similar, apto para estacionamientos.	15.08	9.8	5.28	27.85
67	Bombeo de concreto mediante medios mecánicos con bomba estacionaria.	15.08	9.8	5.28	27.85
87	Construcción de MAMPOSTERÍA EN BLOQUE CATALÁN SPLIT perforación vertical, de 10x15x30.	5.08	3.3	1.78	3.16
162	Suministro transporte e instalación de REFLECTOR LED 50W 5K Reflector LED para uso exteriores IP 65.	6	3.9	2.1	4.41
218	Suministro transporte e instalación de fachada flotante en vidrio templado de 10 mm,.	14	9.1	4.9	24.01
220	Pasamanos en vidrio templado 10 mm, tubería D=2" en acero inoxidable.	5.08	3.3	1.78	3.16
235	Construcción de PISO EN MORTERO 1:5 de NIVELACIÓN, espesor de HASTA 0,09 m.	15.08	9.8	5.28	27.85
244	Suministro y aplicación de ESTUCO ACRÍLICO PROFESIONAL, SOBRE MUROS REVOCADOS.	3.08	2	1.08	1.16

# Ítem	Actividad	Duración con protección CPM (días)	Duración sin protección TOC (días)	Diferencia	Dif. Al cuadrado
274	Suministro, Transporte y Colocación de Caja de paso de 30x30.	6	3.9	2.1	4.41
		Total, suma columna	136.95	77.51	431.53

Fuente:

Elaboración propia.

Actividades de la subcadena

Al igual que las actividades de la cadena crítica, el Software automáticamente muestra las actividades de la cadena secundaria, la cual se conforma con las actividades para las cuales sus sucesoras se encuentran en la cadena crítica.

Tabla 5. Indica las actividades (expresadas con el número del ítem) de la subcadena de la obra piloto con su respectiva duración con y sin tiempos de protección.

SUBCADENA					
# Ítem	Actividad	Duración con protección CPM (días)	Duración sin protección TOC (días)	Diferencia	Dif. Al cuadrado
9	EXCAVACIÓN MANUAL para cajas, filtros y tubería sanitaria (0,60 m hasta 1,20 m de profundidad).	2	1.3	0.7	0.49
37	EXCAVACIÓN PARA CAMPANAS EN PILAS, de 6,0 a 8,0 m de profundidad, en material heterogéneo, con piedras de hasta 0,05 m ³ .	10	6.5	3.5	12.25

# Ítem	Actividad	Duración con protección CPM (días)	Duración sin protección TOC (días)	Diferencia	Dif. Al cuadrado
50	Colocación de CONCRETO CICLÓPEO de 21 Mpa y 40% de piedra con un diámetro entre 4" y 10". para REEMPLAZO.	30	19.5	10.5	110.25
57	Fabricación, instalación y retiro de FORMALETERÍA para COLUMNAS de 0,4 m x 0,8 m.	5	3.25	1.75	3.0625
58	Vaciado de COLUMNAS en concreto PREMEZCLADO de 28 MPa bombeable.	14	9.1	4.9	24.01
61	Construcción de LOSA DE CONTRAPISO en concreto PREMEZCLADO de 21 MPa bombeable.	3	1.95	1.05	1.1025
		Total, suma columna	41.6	22.4	151.165

Fuente:

Elaboración propia.

DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE LOS BUFFERS.

Teniendo en cuenta las tres metodologías que se seleccionaron para poder realizar el dimensionamiento de los buffers y por consiguiente el seguimiento de la obra piloto, a continuación, se muestra cada una de los cálculos realizados para obtener dichos resultados, tanto de los buffers del proyecto como en los buffers de alimentación.

Método de Cortar y Pegar (CP).

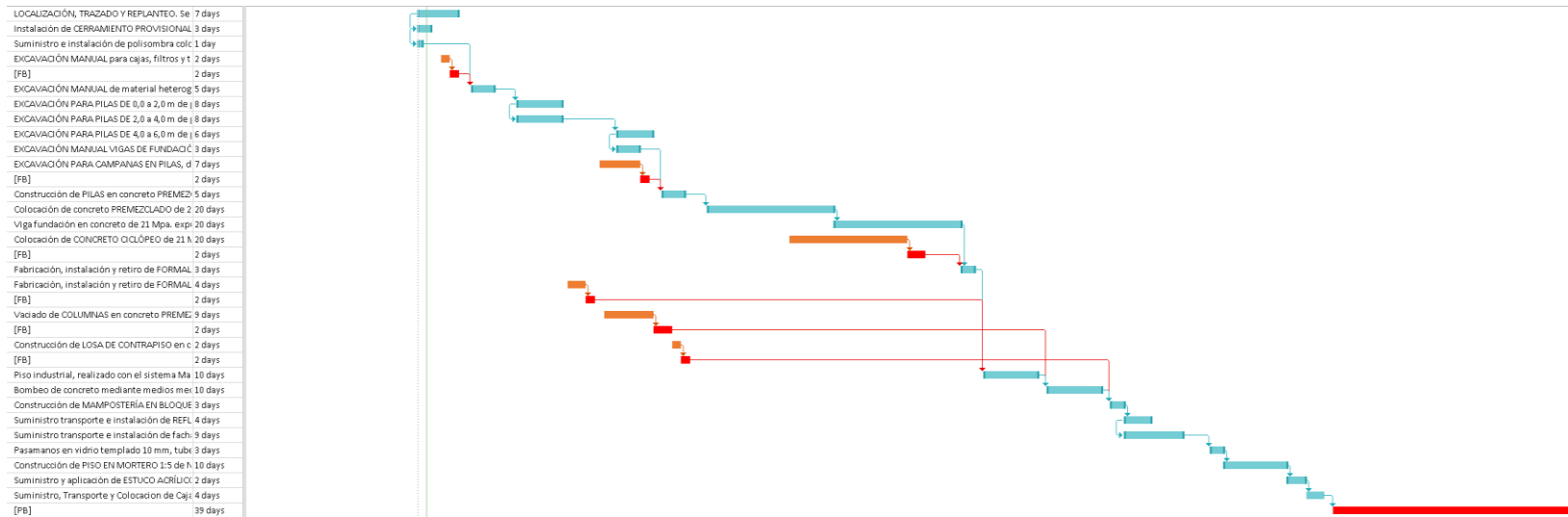
$$PB = 0.5 \sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i) = 0.5 * 76.22 = 38.109 = 39 \text{ días}$$

$$FB = 0.5 \sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i) = 0.5 * 22.4 = 11.2 = 12 \text{ días}$$

	Cortar y Pegar	días
PB	38.10961538	39
FB	11.2	12

En la figura 16 se muestra el diagrama de Gantt con la cadena crítica (color azul), la subcadena (color naranjado) y los buffers tanto del proyecto como de alimentación (color rojo), con el método cortar y pegar, dando una duración total de 157 días para la finalización de la obra.

Figura 16. Cadena crítica con el método cortar y pegar.



Fuente:

Elaboración propia.

Método del Tercio Critico (TC).

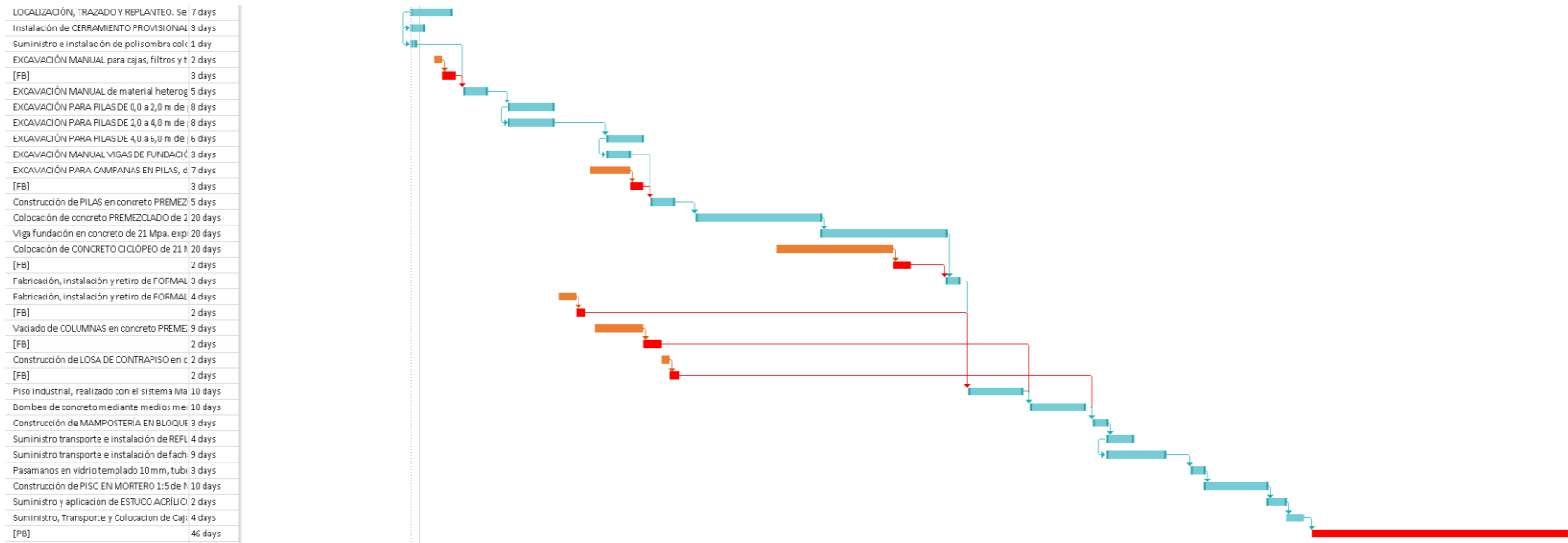
$$PB = \frac{\sum_{i=1}^n dsP_i}{3} = \frac{136.95}{3} = 45.65 = 46 \text{ días}$$

$$FB = \frac{\sum_{i=1}^n dsP_i}{3} = \frac{41.6}{3} = 13.86 = 14 \text{ días}$$

Tercio critico		días
PB	45.65	46
FB	13.86	14

En la figura 17 se muestra el diagrama de Gantt con la cadena critica (color azul), la subcadena (color naranja) y los buffers tanto del proyecto como de alimentación (color rojo), con el método tercio crítico, dando una duración total de 164 días para la finalización de la obra.

Figura 17. Cadena crítica con el método tercio crítico.



Fuente:

Elaboración propia.

Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados (ROOT).

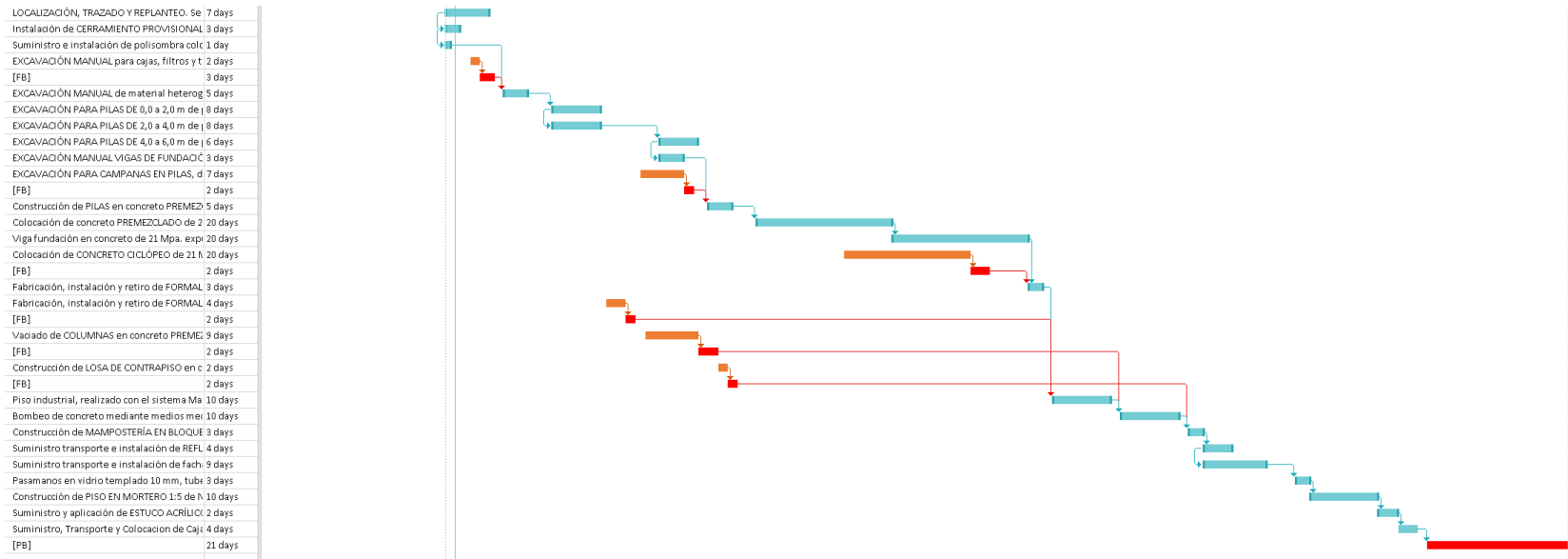
$$PB = \sqrt{\sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i)^2} = \sqrt{423.46} = 20.578 = 21 \text{ días}$$

$$FB = \sqrt{\sum_{i=1}^n (dcP_i - dsP_i)^2} = \sqrt{151.165} = 12.29 = 13 \text{ días}$$

Raíz cuadrada suma de cuadrados		días
PB	20.5780564	21
FB	12.29	13

En la figura 18 se muestra el diagrama de Gantt con la cadena crítica (color azul), la subcadena (color naranjado) y los buffers tanto del proyecto como de alimentación (color rojo), con el método de la raíz cuadrada, dando una duración total de 139 días para la finalización de la obra.

Figura 18. Cadena crítica con el método de la raíz cuadrada.



Fuente:

Elaboración propia.

Las metodologías CP, TC y ROOT serán utilizadas para realizar el seguimiento de la obra con el cronograma donde fue aplicado TOC.

Tabla 6. Cuadro resumen de los días totales para la finalización de la obra con la programación CPM y TOC, teniendo en cuenta las tres metodologías y la duración de los buffers.

Metodología	Días total contrato	Dimensiones de los buffers (días)	
		PB	FB
CPM	124	N/A	N/A
Método Cortar y Pegar	157	39	12
Método del Tercio Critico	164	46	14
Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados	139	21	13

Fuente:

Elaboración propia.

SOCIALIZACIÓN DEL CRONORAMA RESULTANTE CON TOC.

Para poder realizar la socialización y determinar la percepción sobre el nuevo sistema fue necesario capacitar a los funcionarios profesionales ejecutores y controladores del proyecto. La inducción consistió en explicar TOC aplicada en los proyectos de construcción, presentando igualmente, datos encontrados en diferentes fuentes de investigación sobre su implementación con éxito, haciendo énfasis especialmente en la diferencia entre la ruta crítica y la cadena crítica, el dimensionamiento de los buffers y las diferentes metodologías para encontrar dichos tiempos.

Igualmente, se comparte con los profesionales el software utilizado para la selección de la cadena crítica, su funcionamiento y las herramientas básicas que utiliza; así como los criterios que se emplearon para realizar el nuevo cronograma realizado a partir de la aplicación de TOC. Teniendo en cuenta que existen tres metodologías de dimensionamiento de los buffers, se realiza así mismo sus cronogramas

correspondientes, para poder realizar el control y el seguimiento del proyecto con cada uno de ellos.

Posterior a la inducción, se realizaron dos entrevistas para poder sondear a las personas entrevistadas y así saber la percepción sobre la implementación de TOC en la planificación del proyecto; dichas entrevistas se clasifican como entrevista semiestructurada, en la cual la persona entrevistada cuenta con conocimientos especiales, entendidos como teorías subjetivas acerca del tema de investigación, por lo cual fue realizada al jefe de planeación de la universidad Tecnológico de Antioquia. Por otro lado, se hace la entrevista focalizada al ingeniero residente de interventoría, ya que esta se centra en captar lo que el personal interpreta luego de presentar una inducción sobre el tema a tratar.

El contenido y detalles de la entrevista se pueden consultar en el anexo 1. El cuestionario de la entrevista se compone de dos partes: 1. Identificación del entrevistado, 2. Cuerpo de preguntas, donde se indaga al entrevistado para conocer la percepción sobre el nuevo sistema de planificación y control basado en TOC y su aplicación en el contexto del proyecto piloto, abordando los siguientes temas con preguntas abiertas:

- Utilización de diferentes metodologías para la planificación de proyectos.
- Aplicación de la filosofía TOC en la programación de obra.
- Valor agregado que esta da.
- Metodología de dimensionamiento de buffer.

La transcripción de dichas entrevistas, se encuentran en el anexo 2, donde ambos profesionales dan sus puntos de vista sobre la aplicación de esta filosofía; el resultado de la entrevista da a conocer que en el medio de construcción es necesario aplicar diferentes metodologías para poder realizar un mejor control y seguimiento de los proyectos. Los entrevistados consideran como aspecto importante, la realización de la planificación en etapa previa a la construcción del proyecto, puesto que, en muchos casos, no es realizada previamente y afloran inconsistencias con la construcción del proyecto.

Cada uno de los profesionales entrevistados eligieron dos de las tres metodologías para dimensionar los buffer; el primer entrevistado selecciona el método del tercio crítico, pues, de acuerdo con su opinión, en comparación con las otras dos metodologías, tiene un porcentaje mayor de buffer del proyecto y explica que las obras en las cuales ha participado uno de los factores que más influyen con el retraso de los proyectos han sido los trámites relacionados con temas ambientales y lo arqueológico, al estar destinados unos días para estas actividades, muy pocas

veces se cumplen dichos tiempos, y al depender de entes territoriales y nacionales públicos, pueden aumentar los tiempos de entrega. Por otro lado, el segundo entrevistado elige el método de la raíz cuadrada y expresa que prefiere un método basado en la estadística, descartando los métodos empíricos; ya que al tener la diferencia de las actividades con y sin protección, permite inferir más fácilmente el tiempo total que se requiere para poder finalizar el proyecto.

Según la perspectiva de los entrevistados donde hablan sobre la implementación de TOC en la programación de obra, ambos comparten el beneficio en su implementación, ya que con la ayuda de esta metodología pueden llegar a ser más asertivos en el cumplimiento de los tiempos de los cronogramas y a tener siempre una visión más clara sobre lo que está pasando en la obra con un tiempo de acción determinado que permite actuar de forma que se pueda evitar el retraso de las actividades siguientes. De igual forma están de acuerdo en realizar el seguimiento de la obra con el nuevo cronograma y solicitan utilizar los tres métodos para el dimensionamiento de los buffers; así como, realizar el seguimiento del proyecto con el cronograma tradicional, es decir en el momento de la ejecución se realizará el seguimiento con cuatro cronogramas diferentes; donde diariamente se hace el registro de las actividades ejecutadas en la obra.

SEGUIMIENTO DE OBRA CON EL CRONOGRAMA TOC.

Para el seguimiento del cumplimiento del cronograma y avance de obra, se llevó a cabo el registro diario de la ejecución de las diferentes actividades de la obra, teniendo en cuenta ambos cronogramas. Este seguimiento se resume de forma semanal, donde se compara el avance real de la obra contra el programado; el seguimiento real de la obra se realiza teniendo en cuenta el porcentaje de ejecución y restante de cada una de las obras, para este control es necesario tener las cantidades y duración de cada una de las actividades para poder conocer el porcentaje. El seguimiento y control de los cronogramas aplicando TOC con los tres métodos, se hace por un lapso de tres meses y medio, para obtener los datos necesarios y poder continuar con la investigación.

A continuación, se presenta la tabla con el registro semanal del progreso de las actividades, el avance total de la obra, el porcentaje de retraso, los días transcurridos desde la fecha de inicio del proyecto y los días de retraso. Como se

mencionó anteriormente el plazo total del proyecto sin aplicar TOC es de ciento veinticuatro días (124 días).

En la tabla 7, se presenta el seguimiento de la obra en el cronograma inicial con la metodología CPM, donde se muestra el porcentaje de avance programado del proyecto contra el avance real.

Tabla 7. Control de avance de la programación a partir del cronograma CPM.

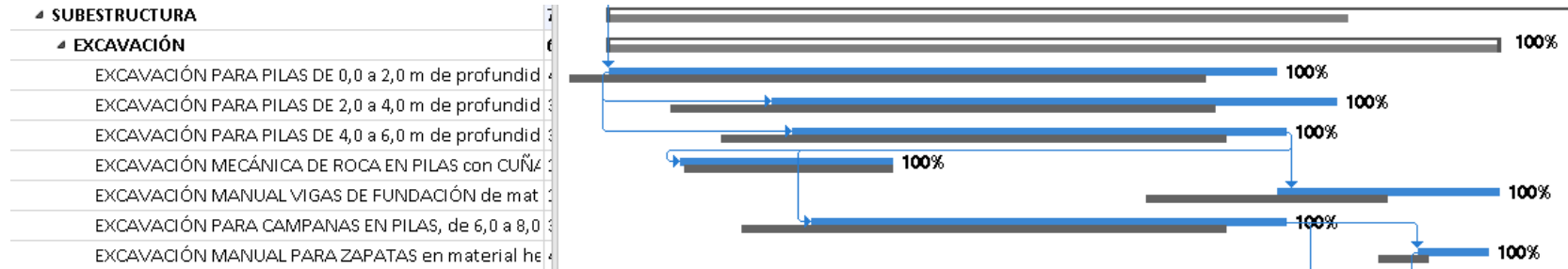
Inicio	10/5/2020						
Total Proy.	124 días	Avance					
		Programado	Ejecutado	% Retraso	Días de retraso	Días transcurridos	Esperado+retraso
1	10/29/2020	6.0%	4.0%	2.0%	2	25	126
2	11/5/2020	7.0%	6.0%	1.0%	1	32	125
3	11/12/2020	10.0%	8.0%	2.0%	2	39	126
4	11/19/2020	12.0%	8.0%	4.0%	5	46	129
5	11/26/2020	13.0%	9.0%	4.0%	5	53	129
6	12/3/2020	15.0%	11.0%	4.0%	5	60	129
7	12/10/2020	17.0%	11.0%	6.0%	7	67	131
8	12/17/2020	20.0%	12.0%	8.0%	10	74	134
9	12/29/2020	28.0%	14.0%	14.0%	17	86	141
10	1/7/2021	32.0%	15.0%	17.0%	21	95	145
11	1/14/2021	40.0%	16.0%	24.0%	30	102	154
12	1/21/2021	54.0%	17.0%	37.0%	46	109	170
13	1/28/2021	68.0%	20.0%	48.0%	60	116	184
14	2/5/2021	82.0%	36.0%	46.0%	57	124	181
15	2/11/2021	96.0%	40.0%	56.0%	69	130	193

Fuente:

Elaboración propia.

En la figura 19 se muestra el seguimiento del proyecto piloto utilizando la metodología CPM, en las excavaciones. Las franjas de color gris muestran la programación inicial, la cual fue entregada por parte del contratista, y las azules el tiempo real de ejecución de estas actividades en obra. En este control que se realizó es notable que las actividades de las excavaciones tanto en pilas como vigas tienen un retraso; lo cual se representa en días en la tabla 7.

Figura 19. Seguimiento con CPM obra piloto



Fuente:

elaboración propia, Microsoft Project.

Teniendo en cuenta la determinación de los buffers en cada una de las metodologías descritas en el trabajo, con los datos recopilados en campo y la información plasmada en las tablas se prosigue al cálculo de las dos variables del Fever Chart, porcentaje de proyecto completado y porcentaje de buffer utilizado, para así poder realizar la comparación de los cronogramas donde la fecha de finalización será marcada por el buffer del proyecto y dichos datos adjuntarlos a cada gráfico, para poder realizar el control del proyecto.

Método de la Raíz Cuadrada de la suma de Cuadrados (ROOT).

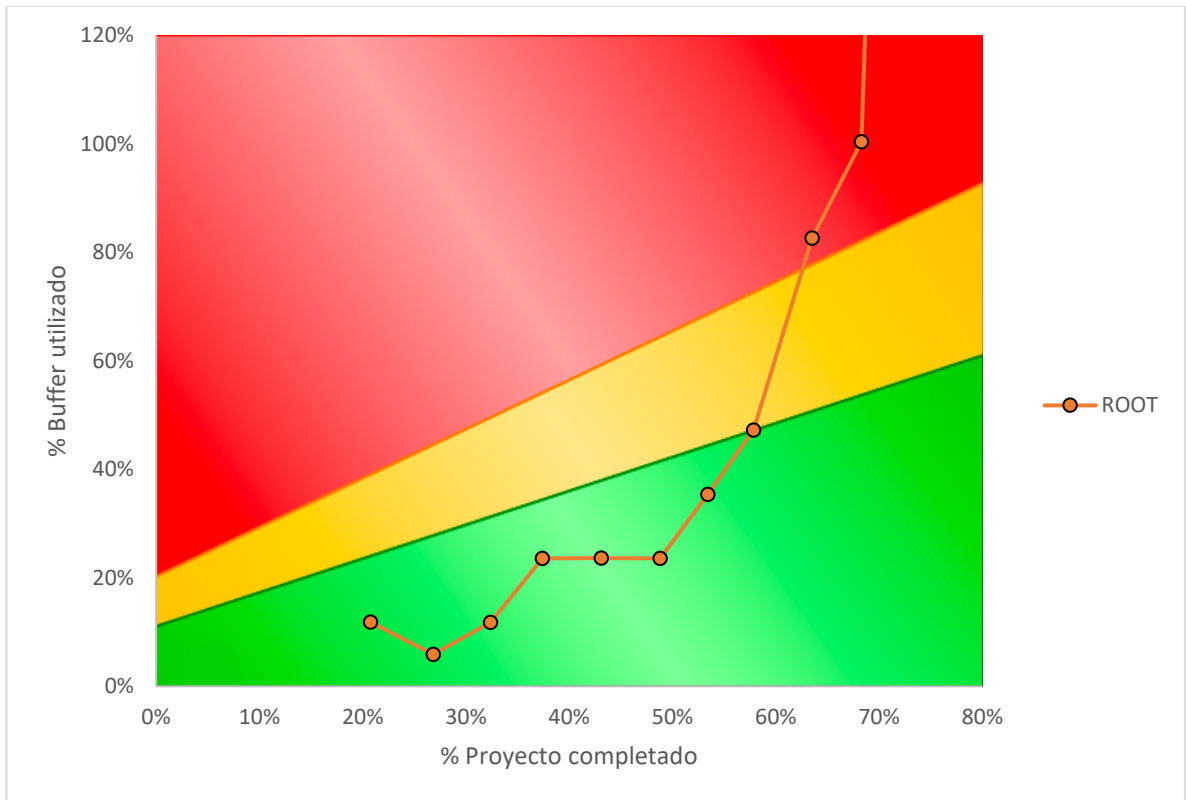
Tabla 8. Registro semanal de actividades y seguimiento de la programación con la metodología ROOT.

Inicio	10/5/2020				PB total (días)	21
Total Proy.	139 días	Avance			ROOT	
		Programado	Ejecutado	% Retraso	%Proyecto completado	% Buffer utilizado
1	10/29/2020	5.3%	3.6%	1.8%	21%	12%
2	11/5/2020	6.2%	5.3%	0.9%	27%	6%
3	11/12/2020	8.9%	7.1%	1.8%	32%	12%
4	11/19/2020	10.7%	7.1%	3.6%	37%	24%
5	11/26/2020	11.6%	8.0%	3.6%	43%	24%
6	12/3/2020	13.4%	9.8%	3.6%	49%	24%
7	12/10/2020	15.2%	9.8%	5.3%	53%	35%
8	12/17/2020	17.8%	10.7%	7.1%	58%	47%
9	12/29/2020	25.0%	12.5%	12.5%	64%	83%
10	1/7/2021	28.5%	13.4%	15.2%	68%	100%
11	1/14/2021	35.7%	14.3%	21.4%	69%	142%
12	1/21/2021	48.2%	17.9%	30.3%	67%	219%
13	1/28/2021	60.7%	15.2%	45.5%	65%	283%
14	2/5/2021	73.2%	32.1%	41.0%	71%	272%
15	2/11/2021	85.6%	35.7%	50.0%	69%	331%

Fuente:

Elaboración propia.

Figura 20. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando el método de ROOT para el dimensionamiento de los buffers.



Fuente:

Elaboración propia.

Método de Cortar y Pegar (CP).

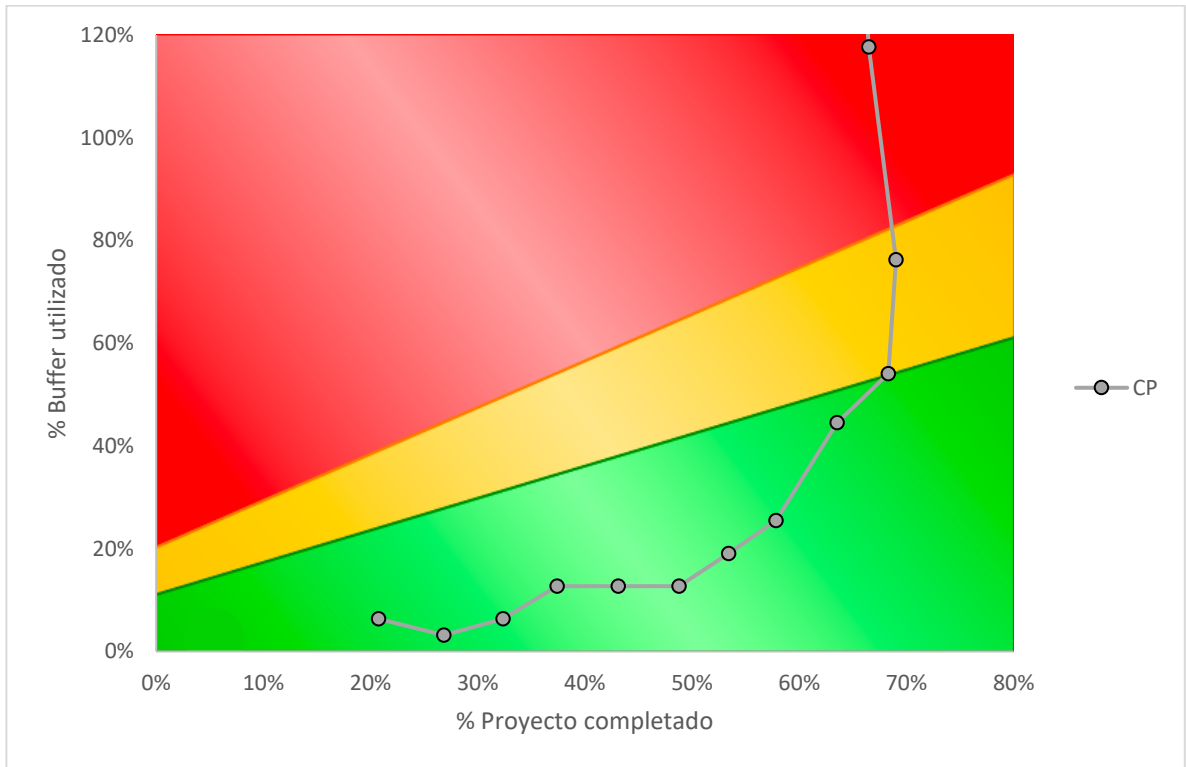
Tabla 9. Registro semanal de actividades y seguimiento de la programación con la metodología CP.

Inicio	10/5/2020				PB total (días)	39
Total Proy.	157 días	Avance			CP	
		Programado	Ejecutado	% Retraso	%Proyecto comple	% Buffer utilizado
1	10/29/2020	4.7%	3.2%	1.6%	21%	6%
2	11/5/2020	5.5%	4.7%	0.8%	27%	3%
3	11/12/2020	7.9%	6.3%	1.6%	32%	6%
4	11/19/2020	9.5%	6.3%	3.2%	37%	13%
5	11/26/2020	10.3%	7.1%	3.2%	43%	13%
6	12/3/2020	11.8%	8.7%	3.2%	49%	13%
7	12/10/2020	13.4%	8.7%	4.7%	53%	19%
8	12/17/2020	15.8%	9.5%	6.3%	58%	25%
9	12/29/2020	22.1%	11.1%	11.1%	64%	45%
10	1/7/2021	25.3%	11.8%	13.4%	68%	54%
11	1/14/2021	31.6%	12.6%	18.9%	69%	76%
12	1/21/2021	42.7%	13.4%	29.2%	67%	118%
13	1/28/2021	53.7%	15.8%	37.9%	65%	153%
14	2/5/2021	64.8%	28.4%	36.3%	71%	146%
15	2/11/2021	75.8%	31.6%	44.2%	69%	178%

Fuente:

Elaboración propia.

Figura 21. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando el método de CP para el dimensionamiento de los buffers.



Fuente:

Elaboración propia.

Método del Tercio Critico (TC).

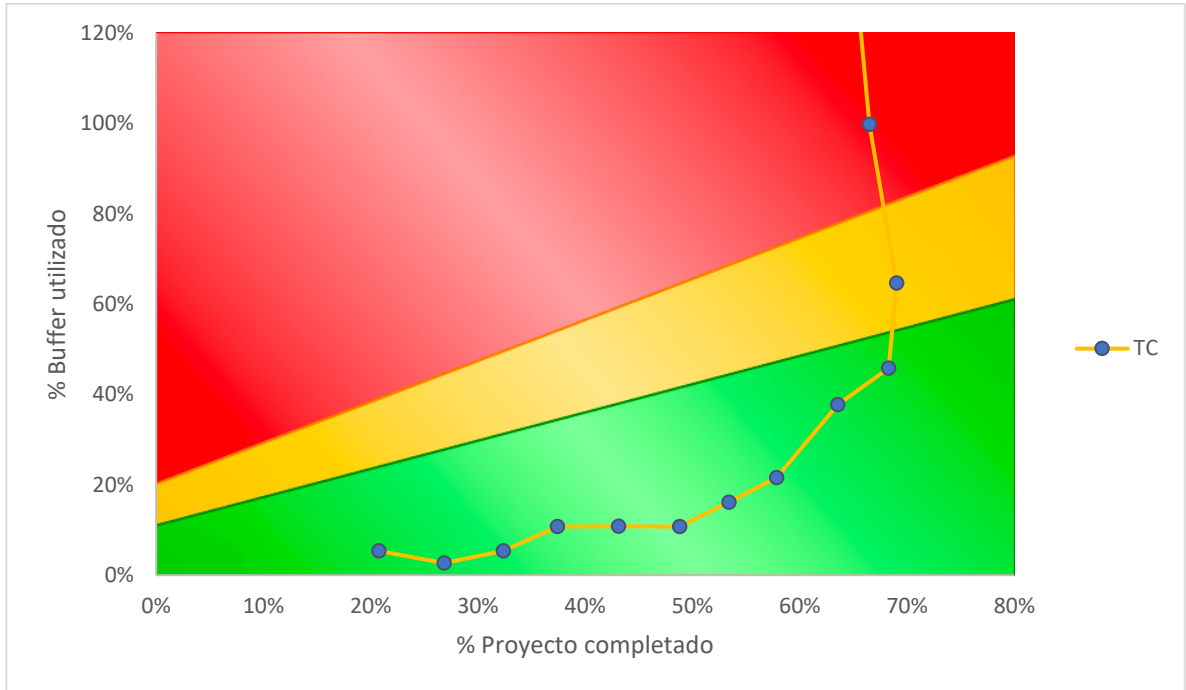
Tabla 10. Registro semanal de actividades y seguimiento de la programación con la metodología TC.

Inicio	10/5/2020				PB total (dias)	46
Total Proy.	164 dias	Avance			TC	
		Programado	Ejecutado	% Retraso	%Proyecto comple	% Buffer utilizado
1	10/29/2020	4.5%	3.0%	1.5%	21%	5%
2	11/5/2020	5.3%	4.5%	0.8%	27%	3%
3	11/12/2020	7.6%	6.0%	1.5%	32%	5%
4	11/19/2020	9.1%	6.0%	3.0%	37%	11%
5	11/26/2020	9.8%	6.8%	3.0%	43%	11%
6	12/3/2020	11.3%	8.3%	3.0%	49%	11%
7	12/10/2020	12.9%	8.3%	4.5%	53%	16%
8	12/17/2020	15.1%	9.1%	6.1%	58%	22%
9	12/29/2020	21.2%	10.6%	10.6%	64%	38%
10	1/7/2021	24.2%	11.3%	12.9%	68%	46%
11	1/14/2021	30.2%	12.1%	18.1%	69%	65%
12	1/21/2021	40.8%	12.9%	28.0%	67%	100%
13	1/28/2021	51.4%	15.1%	36.3%	65%	129%
14	2/5/2021	62.0%	27.2%	34.8%	71%	124%
15	2/11/2021	72.6%	30.2%	42.3%	69%	151%

Fuente

Elaboración propia.

Figura 22. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando el método de TC para el dimensionamiento de los buffers.



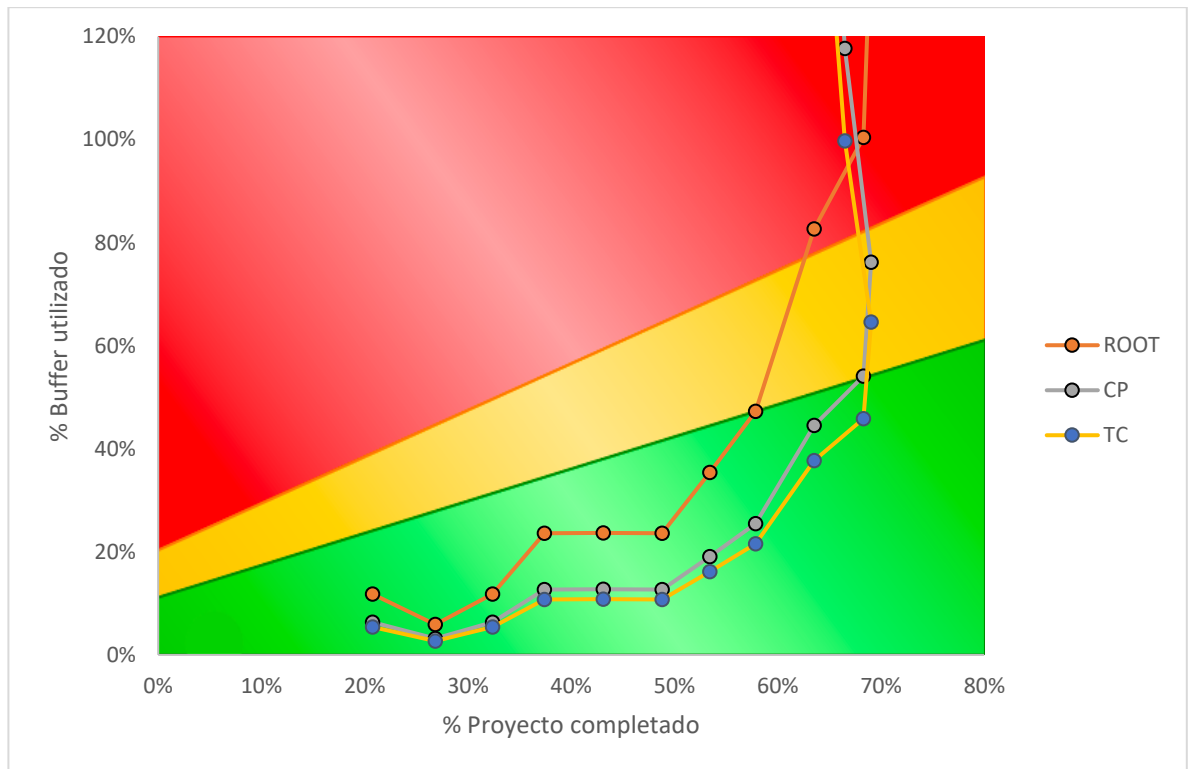
Fuente:

Elaboración propia.

ROOT, CP y TC

La figura 23 muestra el seguimiento de la obra teniendo en cuenta las tres metodologías de dimensionamiento de los buffers, para de esta manera poder determinar cuál de las metodologías utilizadas ofrece una mayor posibilidad de control preventivo. En este caso la metodología del tercio crítico fue la que siempre estuvo por debajo, es decir, el porcentaje del buffer utilizado fue menor que en las otras dos metodologías, siendo la mejor alternativa para este caso de proyectos.

Figura 23. Representación del seguimiento de la obra piloto en el diagrama de fiebre utilizando los tres métodos para el dimensionamiento de los buffers.



Fuente:

Elaboración propia.

Tabla 11. Resumen del registro semanal y el porcentaje de retraso para cada una de las metodologías.

ROOT					CP					TC					CPM				
Inicio	10/5/2020	Avance			Inicio	10/5/2020	Avance			Inicio	10/5/2020	Avance			Inicio	10/5/2020	Avance		
Total	139 días	Programado	Ejecutado	% Retraso	Total	157 días	Programado	Ejecutado	% Retraso	Total	164 días	Programado	Ejecutado	% Retraso	Total	124 días	Programado	Ejecutado	% Retraso
Proy.	Fecha de control				Proy.	Fecha de control				Proy.	Fecha de control				Proy.	Fecha de control			
1	10/29/2020	5.3%	3.6%	1.8%	1	10/29/2020	4.7%	3.2%	1.6%	1	10/29/2020	4.5%	3.0%	1.5%	1	10/29/2020	6.0%	4.0%	2.0%
2	11/5/2020	6.2%	5.3%	0.9%	2	11/5/2020	5.5%	4.7%	0.8%	2	11/5/2020	5.3%	4.5%	0.8%	2	11/5/2020	7.0%	6.0%	1.0%
3	11/12/2020	8.9%	7.1%	1.8%	3	11/12/2020	7.9%	6.3%	1.6%	3	11/12/2020	7.6%	6.0%	1.5%	3	11/12/2020	10.0%	8.0%	2.0%
4	11/19/2020	10.7%	7.1%	3.6%	4	11/19/2020	9.5%	6.3%	3.2%	4	11/19/2020	9.1%	6.0%	3.0%	4	11/19/2020	12.0%	8.0%	4.0%
5	11/26/2020	11.6%	8.0%	3.6%	5	11/26/2020	10.3%	7.1%	3.2%	5	11/26/2020	9.8%	6.8%	3.0%	5	11/26/2020	13.0%	9.0%	4.0%
6	12/3/2020	13.4%	9.8%	3.6%	6	12/3/2020	11.8%	8.7%	3.2%	6	12/3/2020	11.3%	8.3%	3.0%	6	12/3/2020	15.0%	11.0%	4.0%
7	12/10/2020	15.2%	9.8%	5.3%	7	12/10/2020	13.4%	8.7%	4.7%	7	12/10/2020	12.9%	8.3%	4.5%	7	12/10/2020	17.0%	11.0%	6.0%
8	12/17/2020	17.8%	10.7%	7.1%	8	12/17/2020	15.8%	9.5%	6.3%	8	12/17/2020	15.1%	9.1%	6.1%	8	12/17/2020	20.0%	12.0%	8.0%
9	12/29/2020	25.0%	12.5%	12.5%	9	12/29/2020	22.1%	11.1%	11.1%	9	12/29/2020	21.2%	10.6%	10.6%	9	12/29/2020	28.0%	14.0%	14.0%
10	1/7/2021	28.5%	13.4%	15.2%	10	1/7/2021	25.3%	11.8%	13.4%	10	1/7/2021	24.2%	11.3%	12.9%	10	1/7/2021	32.0%	15.0%	17.0%
11	1/14/2021	35.7%	14.3%	21.4%	11	1/14/2021	31.6%	12.6%	18.9%	11	1/14/2021	30.2%	12.1%	18.1%	11	1/14/2021	40.0%	16.0%	24.0%
12	1/21/2021	48.2%	17.9%	30.3%	12	1/21/2021	42.7%	13.4%	29.2%	12	1/21/2021	40.8%	12.9%	28.0%	12	1/21/2021	54.0%	17.0%	37.0%
13	1/28/2021	60.7%	15.2%	45.5%	13	1/28/2021	53.7%	15.8%	37.9%	13	1/28/2021	51.4%	15.1%	36.3%	13	1/28/2021	68.0%	20.0%	48.0%
14	2/5/2021	73.2%	32.1%	41.0%	14	2/5/2021	64.8%	28.4%	36.3%	14	2/5/2021	62.0%	27.2%	34.8%	14	2/5/2021	82.0%	36.0%	46.0%
15	2/11/2021	85.6%	35.7%	50.0%	15	2/11/2021	75.8%	31.6%	44.2%	15	2/11/2021	72.6%	30.2%	42.3%	15	2/11/2021	96.0%	40.0%	56.0%

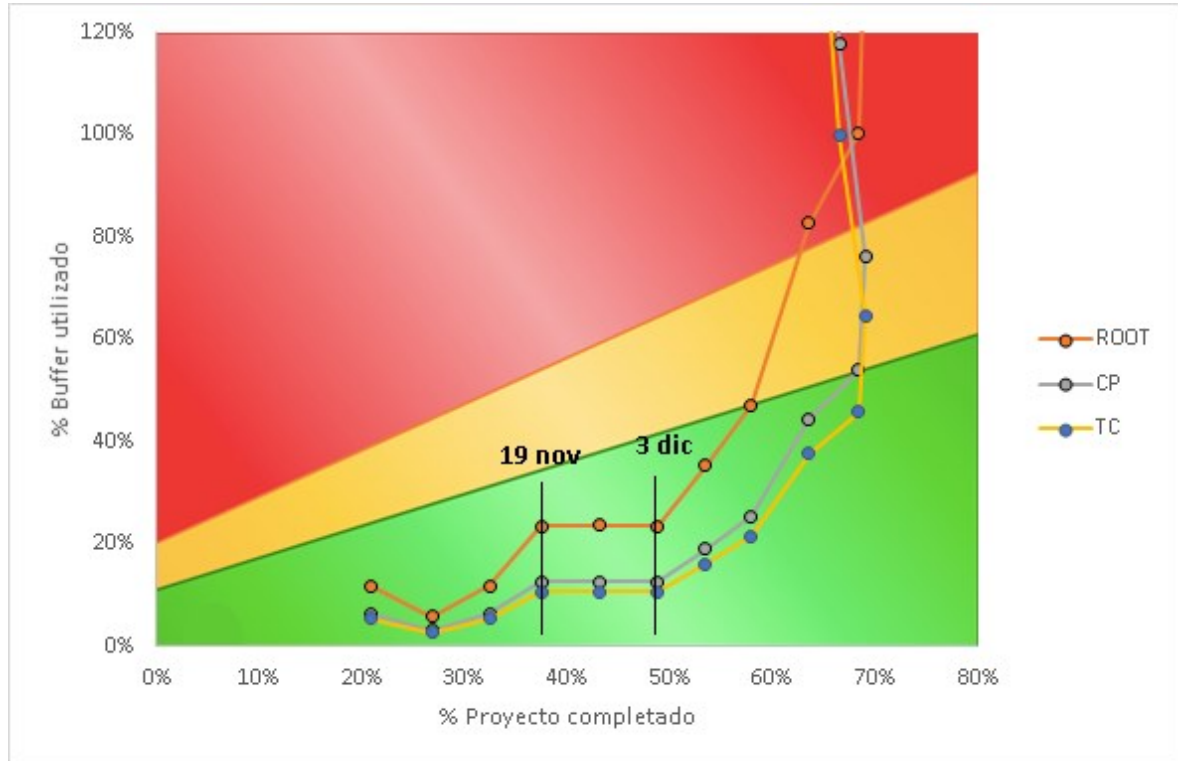
Fuente

Elaboración propia.

Es importante destacar que el seguimiento y control del proyecto con una herramienta como el diagrama de fiebre, presenta diferentes ventajas frente a métodos tradicionales para el personal de obra, ya que, alerta de manera temprana sobre las acciones que se deben tomar al aproximarse a los cambios de colores con el consumo del buffer, como ocurre entre los cortes del 19 de noviembre al 3 de diciembre, donde la pendiente disminuye y queda casi nula, indicando que el consumo del buffer se mantiene estable a medida que la obra va avanzando, al igual que ayuda a visualizar mucho mejor el comportamiento y tendencias del proyecto en cuanto al cumplimiento o no del cronograma.

Al haber transcurrido tres semanas desde el inicio de las actividades, la pendiente en el diagrama de fiebre se encuentra positiva, lo cual informa que se está consumiendo un porcentaje alto del buffer y se está avanzando poco; al notar esto en la obra se opta por aumentar las cuadrillas en las actividades de excavación que se estaban realizando en el momento y distribuir el personal de tal forma que el avance fuera mucho más efectivo; lo cual dio como resultado disminuir la pendiente casi a cero en los siguientes cortes.

Figura 24. Ubicación fechas de corte.



Fuente:

Elaboración propia.

En la semana del corte número 7 se ve claramente en la gráfica de fiebre que la pendiente pasa de estar casi en cero a ser positiva, ya que las actividades entre la semana 6 (corte 3 de diciembre) y 7 se detuvieron al encontrarse en el terreno piezas arqueológicas, por lo cual fue necesario contratar a un experto para poder subsanar esta situación; el cual decide realizar unos apiques consecutivos a lo largo del terreno afectado por la construcción para así lograr evidenciar si se encontraban más de estas piezas en el terreno. Al transcurrir una semana fue posible continuar con la construcción; en la programación CPM en la semana 9 el porcentaje de retraso era del 14%, mientras en las otras 3 metodologías utilizando la TOC el porcentaje era inferior, ya que en este tiempo que no se trabajó se iba consumiendo el buffer del proyecto (PB), el cual es el encargado de proteger la fecha límite de entrega del proyecto.

Al comparar el corte de la semana 12 en la tabla 11, con la metodología CPM el porcentaje de avance programado de la obra había superado el 54% y el porcentaje de retraso estaba en el 37%, mientras con la metodología TOC los porcentajes de retraso de la obra son inferiores, ya que, como se evidencia en las gráficas, lo que está ocurriendo es un consumo del buffer, y una advertencia para los constructores y los supervisores del contrato.

Entre la semana 12 y 15 de construcción se encontraron diferentes imprevistos, los cuales hicieron que el consumo de los buffers se aumentara de forma drástica, aun así, en la semana 15 con la metodología CPM según la programación al contrato únicamente le faltaba el 4% para finalizar, pero su porcentaje de retraso era del 56%, es decir únicamente se llevaba construido el 40% de la obra; con las metodologías utilizando la TOC, el porcentaje más alto programado era del 85% que corresponde a la metodología ROOT, con un retraso del 50%; en este periodo ya se habían consumido los buffers en las tres metodologías pero aún se tenía un tiempo para lograr alcanzar la fecha límite de entrega de la obra. Con la metodología del tercio crítico, el porcentaje programado era del 72% y el porcentaje de retraso del 42% lo que indica que para este tipo de proyecto en el cual se deben tener en cuenta temas arqueológicos y ambientales, es recomendable utilizar dicha metodología, ya que la forma de cálculo de los buffers es la más conservadora, y se puede tener en cuenta una mayor probabilidad de imprevistos que pueden retrasar de forma considerable el proyecto.

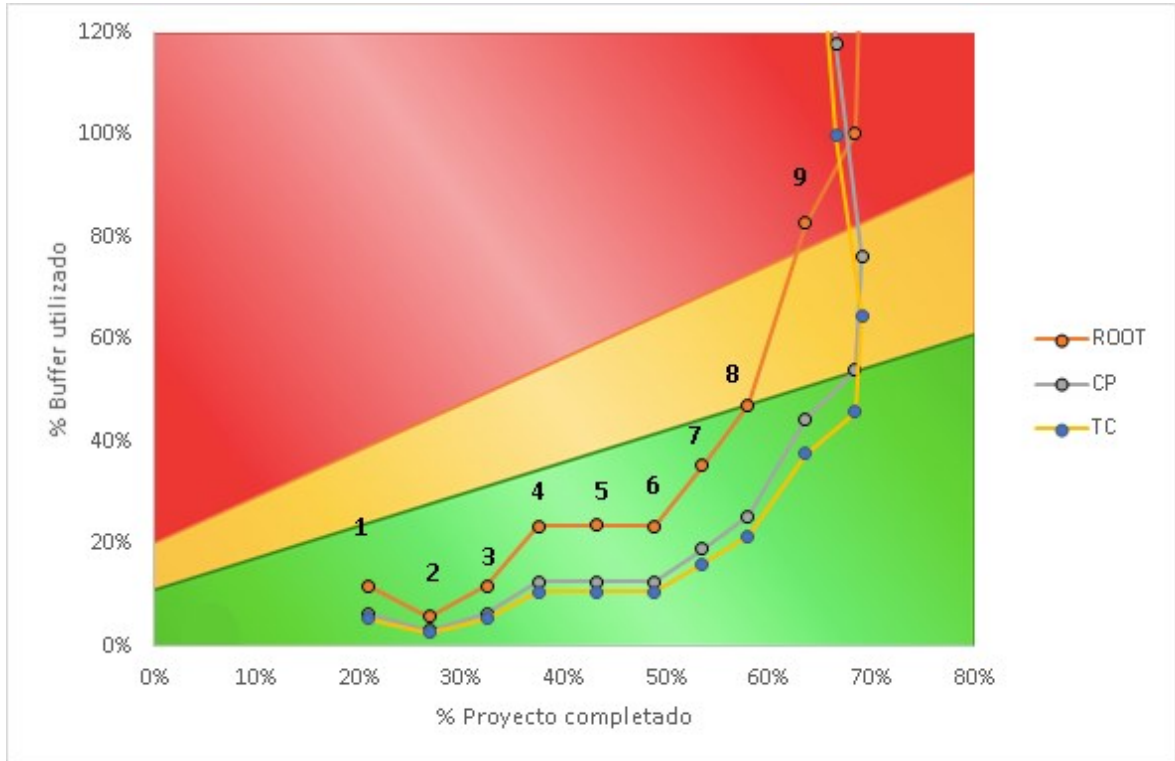
A pesar de las acciones tomadas por el contratista es notable apreciar que en las tres metodologías, el buffer es consumido por completo. Después del 60% del proyecto completado el buffer del proyecto empieza a consumirse drásticamente, por lo cual fue necesario tomar medidas diferentes a las que se estaban empleando para controlar dicho porcentaje y así poder cumplir con la fecha límite de entrega; al llegar al 68% del proyecto completado se le solicita al subcontratista incrementar el personal exclusivamente para la ejecución de la edificación de portería y para poder garantizar que el segundo equipo de trabajo se concentre únicamente en la ejecución de la estructura principal del edificio se procede a actuar y a ejecutar simultáneamente las dos edificaciones.

A pesar de que la obra tuvo un atraso considerable siendo controlada con ambas metodologías, se puede evidenciar que la implementación de los buffers son una ventaja frente a la metodología tradicional CPM, ya que, aunque la obra tenía un atraso, comparándola con esta metodología los buffers ayudan a la protección del tiempo límite de entrega, al no consumir el tiempo de las actividades, si no, que se consume el tiempo de los buffers; otra de las ventajas que presenta la filosofía TOC

es la implementación de los buffers de alimentación, que son los posicionados en las actividades de la subcadena que su sucesora está ubicada en la cadena crítica; esto ayuda a evitar que si alguna de estas actividades de la subcadena se encuentran retrasada, pueda finalizar en la fecha límite antes de comenzar la actividad de la cadena crítica, y así evitar retrasos en esta.

Finalmente son notables los beneficios que pueden ser aplicados en una obra de construcción al implementar TOC en la planificación de los proyectos, ya que dicha filosofía no solo ayuda a disminuir la incertidumbre al considerar la duración del proyecto teniendo en cuenta las duraciones de los buffers calculados para el proyecto, las actividades de la cadena crítica y los recursos utilizados en esta, si no, en el proceso de la ejecución, ayuda a implementar diferentes acciones de respuesta oportuna para evitar retrasos o consumos significativos de buffers, los que ayudan a proteger la fecha límite de entrega del proyecto. En el caso del proyecto de portería y parqueadero al comienzo de la ejecución se pudo controlar dicho consumo y ejecutar las tareas de forma continúa evitando los retrasos, lo que se evidencia en la gráfica en los controles de la semana 4,5 y 6.

Figura 25. Controles por semana



Fuente:

Elaboración propia.

Al pasar el 60% de avance de la obra se encontraron imprevistos que generaron consumo de buffers de manera acelerada; entre estos estaban:

- Tiempos de entrega de los materiales mayores a los previstos.
- Poco o nulo stock en las empresas encargadas de suministrar los materiales de obra.
- Hallazgo arqueológico en zona donde se realizan trabajos.
- Abandono del frente de trabajo por parte del subcontratista responsable del de vigas y columnas.
- Suspensión del suministro de agua en el proyecto.

Se puede observar en la figura 25 que después de haber llegado casi al 70% del proyecto completado el porcentaje del buffer que se había consumido con la metodología ROOT era de un 118%, mientras que en la metodología TC se había consumido un 46% y en CP un 54%, mostrando que la metodología ROOT al dar el menor dimensionamiento del buffer no es apto para proyectos donde la incertidumbre es muy grande y donde sea más probable tener un mayor número de imprevistos.

Al utilizar tres metodologías diferentes para calcular el dimensionamiento de los buffers y lograr incorporarlo en una obra piloto es posible identificar los pro y contra que estas tienen; un aspecto en común que se encuentra es para poder realizar la programación con la filosofía TOC siempre es necesario primero tener presente los tiempos de seguridad de ejecución para cada una de las actividades, ya que los cálculos de los tamaños de los buffers están directamente relacionados con estos tiempos.

CONCLUSIONES

Al comparar la metodología tradicional CPM y la filosofía TOC en la obra piloto, es notable destacar como dicha filosofía ayuda en el control y el seguimiento de la obra, ya que, dispone de buffers y no es necesario reprogramar actividades como normalmente ocurre en las metodologías tradicionales. TOC por su parte tiene otra gran ventaja y es el seguimiento del proyecto con un diagrama de control (diagrama de fiebre), donde visualmente muestra alertas al ejecutor de la obra cuando se aproxima el cambio de franja de color, lo cual significa que se está consumiendo una gran parte del buffer y no está avanzando de acuerdo a los tiempos establecidos; en este punto se deben de tomar acciones para evitar que se siga consumiendo el buffer y que el proyecto avance de forma significativa.

Para el cálculo de estos buffers se utilizaron tres metodologías: cortar y pegar, tercio crítico y el método de la raíz cuadrada, con las cuales se llevó el seguimiento y control del proyecto; desde los primeros cortes el porcentaje de retraso era muy parecido, sin embargo a medida que se iba consumiendo el buffer del proyecto se evidencia que el método del tercio crítico es el que se mantiene siempre por debajo, tanto en retraso como en el consumo de los buffers; esto se debe a que en el momento del cálculo se obtiene un 33% de la duración de la cadena crítica, obteniendo un mayor margen de seguridad que en los otros métodos, lo cual es una excelente metodología para casos donde los proyectos pueden llegar a tener más posibilidades de imprevistos, como por ejemplo, al construir en un lote virgen como en la obra piloto o un lote con difícil acceso para entrada de materiales, entre otros; igualmente se debe tener en cuenta que si se aplica la metodología TC en un proyecto donde la cadena crítica tenga una duración muy larga el dimensionamiento del buffer del proyecto igualmente será muy excesivo, en este caso sería recomendable utilizar otra metodología como la de cortar y pegar, que aunque normalmente su cálculo es con el 50%, el procedimiento de este cálculo se puede ir modificando con base a la experiencia de la aplicación del método, donde puede ser mayor o menor.

La filosofía TOC al gestionar el proyecto con la cadena crítica y ser la encargada de dar la duración real del proyecto, ayuda a identificar los cuellos de botella que realmente impactan el cumplimiento de la ejecución del proyecto; gracias a esto, el ejecutor se puede centrar en las actividades de esta cadena que están generando el retraso, es decir, las cuales se están ejecutando con un tiempo mayor a lo estimado, y así poder tomar decisiones tempranas para evitar que estas sigan siendo cuellos de botella y retrasen verdaderamente la fecha de entrega.

REFERENCIAS

- Araszkiwicz, K. (2017). Application of critical chain management in construction projects schedules in a multi-project environment: A case study. *Procedia Engineering*, 182, 33-41.
- Aziz, R. F. (2013). Optimizing strategy for repetitive construction projects within multi-mode resources. *Alexandria Engineering Journal*, 52(1), 67-81.
- Barbosa, F., Woetzel, J., & Mischke, J. (2017). Reinventing Construction: A Route of Higher Productivity. McKinsey Global Institute.
- Basu, A. (2000). Theory of Constraints compared to a case study of interior design project development scheduling.
- Bauer, J. M., Vargas, A., Sellitto, M. A., Souza, M. C., & Vaccaro, G. L. (2019). The thinking process of the theory of constraints applied to public healthcare. *Business Process Management Journal*.
- Bie, L., Cui, N., & Zhang, X. (2012). Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7343-7356.
- Breen, A. M., Burton-Houle, T., & Aron, D. C. (2002). Applying the theory of constraints in health care: Part 1—the philosophy. *Quality management in healthcare*, 10(3), 40-46.
- Burgos Marín, M., & Vela Ávila, D. Análisis de las causas del incumplimiento de la programación en las obras civiles.
- Cooper, R., & Kaplan, R. S. (1998). The promise-and peril-of integrated cost systems. *Harvard business review*, 76(4), 109-120.
- Deming, W. Edwards. (1989). *Out of the crisis*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fallah, M., Ashtiani, B., & Aryanezhad, M. B. (2010). Critical chain project scheduling: Utilizing uncertainty for buffer sizing. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 3(3), 280-289.
- Feng, J. C., Li, L., Yang, N., Hong, Y. Z., Pang, M., Yao, X., & Wang, L. C. (2011). Critical chain construction with multi-resource constraints based on portfolio technology in South-to-North Water Diversion Project. *Water Science and Engineering*, 4(2), 225-236.
- Fuentes Del Burgo, J., Ruiz Fernández, J. P., Valverde Gascueña, N., & Navarro Astor, E. (2018). REVISIÓN DE MÉTODOS DE DIMENSIONADO DEL BUFFER EN EL MÉTODO DE LA CADENA CRÍTICA.
- García Gutiérrez, M. (2014). Análisis de aplicabilidad y beneficios del método de la Cadena Crítica (CCPM) en proyectos de Ingeniería y Construcción.

- Goldratt, E.M. (1997). *Critical chain*. Great Barrington, MA: The North River Press Publishing Corp.
- Gordo Barreiro, E. M., Potes López, J. A., & Vargas Quimbaya, J. L. (2017). Factores que ocasionan retrasos en obras civiles en Empresas Públicas de Neiva.
- Gupta, M., & Kline, J. (2008). Managing a community mental health agency: A Theory of Constraints based framework. *Total Quality Management*, 19(3), 281-294.
- Hegde, A. L., Jain, A., & Das, B. B. (2021). Resource Buffers in Construction Projects. In *Recent Trends in Civil Engineering* (pp. 451-460). Springer, Singapore.
- Herroelen, W., & Leus, R. (2001). On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. *Journal of operations management*, 19(5), 559-577.
- Herroelen, W., Leus, R., & Demeulemeester, E. (2002). Critical chain project scheduling: Do not oversimplify. *Project Management Journal*, 33(4), 48-60.
- Holmen, J.S. (1995), "ABC vs. TOC: it's a matter of time", *Management Accounting*, Vol. 76, pp. 37-40.
- Huang, S. Y., Chen, H. J., Chiu, A. A., & Chen, C. P. (2014). The application of the theory of constraints and activity-based costing to business excellence: the case of automotive electronics manufacture firms. *Total quality management & business excellence*, 25(5-6), 532-545.
- Iglesias Sánchez, J. L. (Junio de 2005). "Gestión de proyectos (III): Los buffer del proyecto". *Partida Doble*(167), 76-85. Disponible en <http://www.partidadoble.es/>.
- Izmailov, A., Korneva, D., & Kozhemiakin, A. (2016). Effective project management with theory of constraints. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 229, 96-103.
- Jan, S. H., & Ho, S. P. (2006). Construction project buffer management in scheduling planning and control. In *2006 Proceedings of the 23rd International Symposium on Robotics and Automation in Construction* (pp. 858-863).
- Kaijun, L., Wen, S., Xuejun, H., & Lin, P. (2017). Schedule of supply chain management project based on TOC. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(5), 2801-2809.
- Lau, E., & Kong, J. J. (2006, November). Identification of constraints in construction projects to improve performance. In *Proceedings of the Joint Conference on Construction, Culture, Innovation and Management, Dubai, November* (pp. 26-29).

- Leach, L. P. (1999). Critical chain project management improves project performance. *Project Management Journal*, 30(2), 39-51.
- Leach, P. L. (2014). *Critical Chain Project Management* (3^a ed.). Boston, Massachusetts, Estados Unidos: Artech House.
- Lo, T. Y., Fung, I. W., & Tung, K. C. (2006). Construction delays in Hong Kong civil engineering projects. *Journal of construction engineering and management*, 132(6), 636-649.
- Long, L. D., & Ohsato, A. (2008). Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty. *International journal of project management*, 26(6), 688-698.
- López de Ávila Muñoz, M. (16 de Septiembre de 2009). Critical Chain <in a nutshell>. Blog Nodos en la Red. Publicado en <http://nodos.typepad.com/>.
- Moreno Natera, A. A., & Villa Sanmiguel, L. A. (2020). Análisis de variables causantes de retrasos de obras viales en la Región Caribe (Bachelor's thesis, Corporación Universidad de la Costa).
- Nasution, S. H. (1994). Fuzzy critical path method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24(1), 48-57.
- Newbold, R. C. (1998). *Project Management in The Fast Lane: applying the Theory of Constraints*. London: CRC Press.
- Newbold, R. C. (1998). *Project management in the fast lane: applying the theory of constraints*. CRC Press.
- Pai, S., & Giridharan, S. (2012). Application of theory of constraints and critical chain method for project management in ultra mega power projects (UMPP). National institute of construction management and research (NICMAR).
- Rahman, S. U. (1998). Theory of constraints. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Rand, G. K. (2000). Critical chain: the theory of constraints applied to project management. *International Journal of Project Management*, 18(3), 173-177.
- Santiago, J., & Magallon, D. (2009). Critical path method. *CEE320, Winter 2013*.
- Sarkar, D., Jha, K. N., & Patel, S. (2018). Critical chain project management for a highway construction project with a focus on theory of constraints. *International Journal of Construction Management*, 1-14.
- Sheu, C., Chen, M. H., & Kovar, S. (2003). Integrating ABC and TOC for better manufacturing decision making. *Integrated Manufacturing Systems*.
- Street, I. A. (2000). The pitfalls of CPM scheduling on construction projects. *Cost Engineering*, 42(8), 35.

- Trojanowska, J., & Dostatni, E. (2017). Application of the theory of constraints for project management. *Management and production engineering review*, 8.
- Tukul, OI, Rom, WO y Eksioglu, SD (2006). Una investigación de las técnicas de dimensionamiento del búfer en la programación de cadenas críticas. *Revista europea de investigación operativa* , 172 (2), 401-416.
- Vázquez García, E., Amiama Ares, C., & Barrasa Rioja, M. (2015). APROXIMACIÓN A LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA CADENA CRÍTICA A PROYECTOS DE OBRA CIVIL.
- Vázquez García, E., Amiama Ares, C., & Barrasa Rioja, M. (2016). APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO DE LA CADENA CRÍTICA A UN PROYECTO DE INGENIERÍA CIVIL.
- Vázquez García, E., Amiama Ares, C., & Barrasa Rioja, M. (2017). CADENA CRÍTICA: DIMENSIONAMIENTO DE LOS BUFFERS DEL PROYECTO.
- Yang, J. B. (2003, September). Applying the theory of constraints to construction scheduling. In *Proceedings of Second International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC 02)* (Vol. 1, pp. 175-180).
- Zhang, J., Jia, S., & Diaz, E. (2018). Dynamic monitoring and control of a critical chain project based on phase buffer allocation. *Journal of the Operational Research Society*, 69(12), 1966-1977.
- 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.
- Zhao, Z. Y., You, W. Y., & Lv, Q. L. (2008, October). Applications of fuzzy critical chain method in project scheduling. In *2008 Fourth International Conference on Natural Computation* (Vol. 6, pp. 473-477). IEEE.
- Zohrehvandi, S., & Khalilzadeh, M. (2019). APRT-FMEA buffer sizing method in scheduling of a wind farm construction project. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

ANEXOS

Anexo 1.

Entrevista realizada a los profesionales encargados de la ejecución de la obra.

Orden de la entrevista

- Presentación:
Nombre
Profesión
Cargo
Años de experiencia
- ¿Qué opina sobre utilizar diferentes metodologías a la de CPM para el seguimiento de la planificación de los proyectos de construcción?
- ¿Qué opinión tiene sobre implementar la filosofía de teoría de restricciones en la programación de obra?
- ¿Qué valor agregado le daría esta filosofía al seguimiento y control del proyecto?
- Teniendo en cuenta las tres metodologías para calcular el tamaño de los buffers, ¿Cuál considera que es la más apropiada y por qué?

Anexo 2.

Transcripción de las entrevistas.

1. Director de planeación del Tecnológico de Antioquia

- Presentación:

Mi nombre es Julio Contreras, soy el director de planeación del Tecnológico de Antioquia y supervisor del proyecto de la construcción de la primera fase de la primera etapa del campus Aburra Sur, soy ingeniero industrial, especializado en ingeniería en operaciones de manufactura y servicios y experto en metodologías japonesas, en la aplicación de teoría de restricciones a procesos de manufactura y de servicios.

- ¿Qué opina sobre utilizar diferentes metodologías a la de CPM para el seguimiento de la planificación de los proyectos de construcción?

Mi opinión sobre la utilización de diferentes metodologías para el seguimiento de la planificación de proyectos de construcción, estoy de acuerdo, ya que desde los años noventa, desde la publicación del libro “LA META” Goldratt, se cambia el paradigma tradicional en la administración de las operaciones. Hay un cambio de paradigma del cual estamos acostumbrados, al que nos enseñaron en occidente, con toda la administración científica de Taylor, donde se hablaba de eficiencia por proceso, hay un cambio importante de paradigma hacia un tema de eficiencia global, donde lo que importa realmente es, en el caso de procesos, todo el tema de poder lograr al final, en el caso de manufactura, que haya facturación para que haya rentabilidad para los procesos; y lo que nos enseña Goldratt es que el mundo de las operaciones se rige a partir de las restricciones de procesos, no importa que tan rápido vaya una actividad o un proceso, siempre los que restringen las operaciones son los que van a marcar el ritmo, en este caso en obras civiles, del proyecto de construcción.

- ¿Qué opinión tiene sobre implementar la filosofía de teoría de restricciones en la programación de obra?

Para nosotros sería muy interesante utilizar este nuevo paradigma ya que estaríamos aplicando una nueva metodología que nos permitiría ser más asertivos con el cumplimiento de los tiempos del cronograma del proyecto como tal, ya que, históricamente en las obras que ha realizado la institución hemos tenido atrasos desde el 20% hasta el 50% en tiempo de ejecución de los proyectos y pienso que esto nos plantea la necesidad de cambiar la manera de cómo estamos administrando los proyectos en el Tecnológico de Antioquia.

- ¿Qué valor agregado le daría esta filosofía al seguimiento y control del proyecto?

Debido a que somos un ente público, cada vez que se hacen adiciones, ya sea de tiempo o de recursos, implica un tema complejo de contratación que puede llegar a términos de vigilancia de contraloría; esto nos lleva a que mientras más asertivos seamos en la programación, se van a tener menos problemas en el momento de la ejecución. El valor agregado va a ser que ya no nos vamos a concentrar en procesos aislados, si no, en las actividades de la cadena crítica que es la que propone Goldratt y más aún en un tema de eficiencia global del proyecto sin concentrarse de manera aislada en cada una de las actividades del proyecto; y los buffers nos van a permitir tener ese tiempo de cualquier imprevisto que pueda pasar, que en operaciones siempre ocurre por temas externos o variables internas que muchas veces no se pueden visualizar en la etapa de planificación.

- Teniendo en cuenta las tres metodologías para calcular el tamaño de los buffers, ¿Cuál considera que es la más apropiada y por qué?

La metodología que más estaría de acuerdo a implementar, sería la metodología del tercio crítico, ya que con los cálculos realizados para encontrar el dimensionamiento de los buffers, me parece que es una técnica que hace énfasis al comportamiento del proyecto, en este caso donde tenemos un lote virgen que las actividades de la programación de la obra tienen una alta variabilidad lo que son el tema ambiental, el tema arqueológico; que en la planeación están destinados unos días, pero estos tiempos pueden variar ya que dependemos de entes territoriales y nacionales públicos, que muchas veces sus tiempos pueden ser un poco más largos. El método del tercio crítico es el menos optimista de los otros métodos evaluados, el que más tiempo de plazo da para la finalización del proyecto, por esta razón creo que puede ser el más acertado con la realidad del proyecto.

2. Ingeniero civil, especialista en estructuras, empresa EIP SAS encargada de la interventoría del proyecto portería y parqueadero Aburra Sur.

- Presentación:

Mi nombre es Julián David Hidalgo Restrepo, soy ingeniero civil del Politécnica Jorge Isaza Cadavid, especialista en estructuras de la universidad Nacional de Colombia, actualmente trabajo en la empresa Estructuras Interventorías y Proyectos (EIP S.A.S) que se encarga de actividades de consultoría e interventoría de obras. En este momento nos encontramos en la ejecución del proyecto de la primera etapa primera fase del campus Aburra Sur del Tecnológico de Antioquia en el municipio de Itagüí y desempeño el cargo de residente de interventoría del proyecto mencionado.

- ¿Qué opina sobre utilizar diferentes metodologías a la de CPM para el seguimiento de la planificación de los proyectos de construcción?

Para dar respuesta a esta pregunta, estoy de acuerdo al utilizar herramientas nuevas y eficientes porque nos permite en obra ayudar a controlar, planificar y corregir en el momento de la ejecución de los proyectos; sabemos que las mayores dificultades que se tienen en los proyectos son por problemas de programación, contratiempos o eventualidades que muchas veces se pueden resolver en el transcurso de la ejecución del contrato pero que requieren unas metodologías o herramientas que permitan identificar esas posibles problemáticas antes de, y al utilizar diferentes metodologías de programación y planeación nos permitirá identificar esos contratiempos y lograr ser más eficientes en los procesos de obra.

- ¿Qué opinión tiene sobre implementar la filosofía de teoría de restricciones en la programación de obra?

En respuesta a la pregunta anterior, creo que es una herramienta muy útil si se implementa en una forma adecuada en los procesos de obra; sabemos que estos procesos tienen una cantidad considerable de actividades, pero que son unas actividades específicas las que representan el mayor tiempo de ejecución o de dificultades en obra, esto quiere decir que, aplicando esta teoría de restricciones podemos evaluar y podemos identificar dificultades en estas actividades críticas antes de haber realizado su ejecución, que nos permitan ser más eficientes al momento de realizar en el campo la actividad. Esta nueva programación nos permite dar soluciones antes de, y, por lo tanto, al momento de ejecución ahorrarnos un tiempo considerable que se traduce en costos y en la entrega final del proyecto en el tiempo esperado.

- ¿Qué valor agregado le daría esta filosofía al seguimiento y control del proyecto?

Creería que en términos de efectividad, eficiencia y tiempos podría ser el valor agregado que esta filosofía de la teoría de restricciones le entrega a los proyectos de construcción, por que como anteriormente se mencionaba nos permite identificar las actividades críticas y sus posibles dificultades a la hora de ejecutarlas; con lo cual se puede llegar a buscar soluciones antes de llegar a la ejecución de la actividad, lo que va a disminuir en costos y tiempos finales en la ejecución del proyecto, este sería el mayor valor agregado que uno le puede sacar a esta filosofía.

- Teniendo en cuenta las tres metodologías para calcular el tamaño de los buffers, ¿Cuál considera que es la más apropiada y por qué?

Implementaría la metodología de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, ya que a pesar de que las tres metodologías son formulas empíricas, esta metodología en específico utiliza ecuaciones estadísticas o probabilísticas, que con la información que se tiene que es la diferencia entre el tiempo de la actividad con protección menos el tiempo de la actividad sin protección, nos permite inferir el tiempo total que se requiere de un proyecto para finalizarse, teniendo en cuenta los imprevistos que pueden llegar a presentarse en la ejecución; es decir mediante la información conocida, tiempos con y sin protección, a partir de una ecuación estadística permite inferir el tiempo adicional que va a requerir el proyecto para poder finalizarlo, por esta razón me parece más confiable esta metodología.