



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE APLICABILIDAD Y BENEFICIOS DEL MÉTODO
DE LA CADENA CRÍTICA (CCPM) EN PROYECTOS DE
INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MANUEL FELIPE GARCÍA GUTIÉRREZ

**PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO POLANCO CARRASCO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAM WRAGG LARCO
EDGARDO GONZALEZ LIZAMA**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: MANUEL FELIPE GARCÍA GUTIÉRREZ
FECHA: 5 DE DICIEMBRE DE 2014
PROF. GUÍA: SR. ALEJANDRO POLANCO

ANÁLISIS DE APLICABILIDAD Y BENEFICIOS DEL MÉTODO DE LA CADENA CRÍTICA (CCPM) EN PROYECTOS DE INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN

En general las empresas y organizaciones como respuesta a los rápidos avances tecnológicos, la globalización de los mercados y el aumento de la competencia en la industria, deben desarrollar estrategias para la mejora, innovación y desarrollo de nuevos productos. La necesidad de poner en marcha sus proyectos en plazos cada vez más reducidos, hace que la capacidad para acelerar los proyectos de Ingeniería y Construcción sea un factor clave para su éxito en el contexto empresarial y público.

El objetivo general del presente trabajo de título es recopilar y presentar los fundamentos y experiencias en el uso del método CCPM en proyectos de Ingeniería y Construcción y comparar con el método más tradicionalmente usado en la industria, el método del Camino Crítico CPM. Como objetivos específicos se plantea recopilar información del estado del arte del método de la cadena crítica CCPM; analizar las ventajas y desventajas del método de la cadena crítica CCPM, presentar diferentes cronogramas para 4 proyectos tipo (edificio habitacional, conjunto habitacional, metro y camino) con ambos métodos CCPM y CPM, comparar sus resultados de planificación y finalmente realizar un análisis de la aplicabilidad y beneficios del método CCPM a los proyectos.

De los resultados obtenidos al aplicar la metodología CCPM en la planificación de los 4 proyectos estudiados se puede señalar que efectivamente se logra una planificación con menor plazo y recursos que la obtenida con CPM.

Como conclusión principal de esta memoria se obtiene que el enfoque distinto de manejar los márgenes de seguridad de duraciones incluidos en cada actividad, la consideración explícita de la dependencia de recursos, la limitación de la multitarea y la consideración de los problemas de comportamiento humano, permiten obtener una planificación flexible que resuelve la mayoría de las debilidades del CPM, en particular la inmediata desactualización que experimenta cualquier cronograma CPM.

Finalmente se puede concluir que el método CCPM es un método conceptualmente diferente al CPM pues identifica cadenas críticas en vez de camino de actividades críticas y desde un punto de vista de gestión permite manejar las holguras de tiempo de manera centralizada y con mayor eficiencia que el método CPM. Sin embargo también se concluye que el método CCPM requiere de un fuerte cambio cultural y de gestión, cambio que no se visualiza de fácil y rápida implantación en la industria.

Agradecimientos:

A mi profesor guía por su paciencia y dedicación a este trabajo.

A mis padres y hermanos que han sido un apoyo fundamental durante toda mi vida para lograr cumplir esta meta.

A mi polola por su paciencia y apoyo incondicional en momentos de estrés.

A mis amigos de la universidad que fueron un gran apoyo durante todos los años de carrera, ellos me ayudaron a pasar por la travesía que significa estudiar fuera del hogar.

A mis amigos de Coquimbo que a pesar de la distancia nunca dejan de estar presentes.

A mis nuevos amigos de Santiago, Chile y del mundo que he conocido en estos años y me han ayudado a tener una visión más amplia de la vida.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Introducción al capítulo.....	1
1.2	Contextualización	1
1.3	Objetivo	1
1.3.1	Objetivos específicos.....	1
1.4	Metodología.....	2
1.5	Descripción del método CPM (Camino Critico)	3
1.5.1	Método CPM.....	3
1.5.2	Ejemplo de malla	7
1.5.3	Metodologías y Herramientas de apoyo complementarias al CPM	8
1.5.4	Debilidades del método CPM	13
1.6	Descripción del Método CCPM.....	14
1.6.1	Fundamentos teóricos	16
1.6.2	Conceptos CCPM.....	17
1.6.3	Criterio de reducción de estimación de duraciones de actividades “Criterio P(50)”	18
1.6.4	Proceso de programación CCPM	18
1.6.5	Dimensionamiento de Buffers.....	22
1.6.6	Ejemplo 1: Malla simple.....	23
1.6.7	Ejemplo 2: Malla simple con restricción de recursos	24
1.6.8	Ejemplo 3: Malla compleja.....	26
1.7	Tabla de Bibliografía.....	31
2	Análisis comparativo de los métodos CCPM y CPM.	32
2.1	Introducción al capítulo.....	32
2.2	Criterio 1: Los objetivos propios de cada método.....	33
2.3	Criterio 2: Enfoque de cada método.	34
2.4	Criterio 3: Gestión de los riesgos.....	35
2.5	Criterio 4: La gestión de los recursos.	36
2.6	Criterio 5: Enfoque para los problemas de comportamiento humano.....	37
2.6.1	Ley de Parkinson	37
2.6.2	Síndrome del Estudiante	37
2.6.3	Curva de aprendizaje.....	37
2.7	Criterio 6: La programación de las actividades.....	39

2.8	Criterio 7: Enfoque y metodología para la replanificación	40
2.9	Criterio 8: Los indicadores para el seguimiento del cumplimiento del cronograma	41
2.10	Tabla comparativa de ambas metodologías	42
3	Análisis de proyectos tipos con CPM y CCPM	44
3.1	Introducción	44
3.2	Proyecto de Edificio de Departamentos	45
3.2.1	Descripción	45
3.2.2	Actividades Principales	45
3.2.3	Supuestos	46
3.2.4	Cronograma CPM	47
3.2.5	Desarrollo por CCPM	49
3.2.6	Análisis	51
3.3	Proyecto de Conjunto Habitacional	55
3.3.1	Descripción:	55
3.3.2	Actividades Principales	56
3.3.3	Supuestos	58
3.3.4	Cronograma CPM	59
3.3.5	Desarrollo por CCPM	62
3.3.6	Análisis	64
3.4	Proyecto de Metro	67
3.4.1	Descripción	67
3.4.2	Actividades principales	67
3.4.3	Supuestos	67
3.4.4	Cronograma CPM	68
3.4.5	Desarrollo por CCPM	70
3.4.6	Análisis	73
3.5	Proyecto de camino	76
3.5.1	Descripción	76
3.5.2	Actividades principales	76
3.5.3	Supuestos	76
3.5.4	Cronograma CPM	77
3.5.5	Desarrollo por CCPM	77
3.5.6	Análisis	80

4	Análisis de Aplicabilidad, Beneficios y Conclusiones	84
4.1	Introducción al capítulo.....	84
4.2	Resumen de resultados y análisis de aplicabilidad teórica a proyectos	84
4.3	Beneficios:.....	85
4.3.1	Duración dinámica para las actividades	85
4.3.2	Consideración de problemas de comportamiento humano.....	85
4.3.3	Manejo de holguras a través de Buffers controlados por jefe de proyecto .	85
4.3.4	Consideración explícita de la dependencia de recursos.....	85
4.3.5	Protección de la cadena crítica de actividades mediante el uso de Feeding Buffers	85
4.3.6	Aumento de productividad limitando la multitarea	85
4.3.7	Experiencias prácticas de aplicación en proyectos.....	86
4.4	Conclusiones	87
4.4.1	Conclusiones generales sobre la metodología CCPM.....	87
4.4.2	Conclusiones de la aplicabilidad del CCPM.	88
5	Bibliografía.....	89

Índice de tablas

Tabla 1 : Actividades para malla típica.....	7
Tabla 2: Consumo de recursos de un proyecto.....	12
Tabla 3: Consumo de recursos nivelado	12
Tabla 4: Tabla comparativa de ambas metodologías.....	43
Tabla 5 : Actividades principales para proyecto de Edificio de Departamentos.	45
Tabla 6 : Actividades principales para Proyecto de Conjunto habitacional.	56
Tabla 7 : Duraciones para actividades de fundaciones.	60
Tabla 8 : Duraciones para actividades de Obra Gruesa.....	60
Tabla 9 : Actividades principales para proyecto de metro.	67
Tabla 10 : Actividades principales para proyecto de camino.....	76
Tabla 11: Resumen de resultados de la aplicación de CCPM a los proyectos tipo.....	84

Índice de Figuras

Figura 1: Nomenclatura para un nodo en malla CPM	4
Figura 2: Malla CPM.....	7
Figura 3: Malla CPM resuelta	8
Figura 4: Duraciones PERT.....	9
Figura 5: Curva de Probabilidad de duraciones de PERT	10
Figura 6: Histograma sin nivelación de recursos.....	12
Figura 7: Histograma con nivelación de recursos.....	12
Figura 8: Ejemplo de dos actividades secuenciales	15
Figura 9: Diagrama de red CCPM en donde se utilizan todos los Buffers.....	18
Figura 10: Diagrama de flujo para la primera etapa de la metodología CCPM	21
Figura 11: Diagrama de flujo para Etapas 3, 4, 5 y 6 de la metodología CCPM	21
Figura 12: Proyecto programado con fechas tempranas.....	23
Figura 13: Primer paso, crear la cadena crítica al reducir la duración de las actividades y programar con fechas tardías.....	24
Figura 14: Al no existir restricción de recursos, no se añade Resource Buffer	24
Figura 15: El mismo proyecto, esta vez con restricción de recursos.....	25
Figura 16: Dos alternativas para resolver el conflicto de recursos	25
Figura 17: Primera opción con Feeding y Project Buffer	26
Figura 18: Ejemplo 3 programado por CPM.....	27
Figura 19: Carta Gantt de ejemplo complejo con la duración de las actividades ya reducidas.....	27
Figura 20: Restricciones de recursos niveladas	28
Figura 21: Proyecto con Feeding Buffer y Project Buffer	29
Figura 22: Malla de proyecto complejo programada por CPM	30
Figura 23: Malla de proyecto complejo programado por CCPM.....	30
Figura 24: Bibliografía organizada según año	31
Figura 25: Bibliografía organizada según temática	31
Figura 26: Curva de aprendizaje	38
Figura 27: Etapa de Diseño y Project Management	47
Figura 28: Etapa de construcción de proyecto real.	48
Figura 29: Etapa de Construcción Proyecto de Edificio simplificado.....	49
Figura 30: Etapa de construcción con plazos reducidos utilizando criterio P(50).....	50
Figura 31: Cronograma CCPM con los Buffers insertados.....	51
Figura 32: Comparación de duraciones para proyecto de edificio de departamentos ...	51
Figura 33: Comparación de para Proyecto de Edificio de departamentos Completo	52
Figura 34: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.....	53
Figura 35: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.....	54
Figura 36: Conjunto Habitacional	55
Figura 37: Proyecto conjunto habitacional Peuco Maraton.	59
Figura 38: Etapa de diseño y Project Managment simplificado	60
Figura 39: Etapa de construcción.....	61
Figura 40: Cronograma simplificado con reducciones aplicando criterio P(50)	62

Figura 41: Proyecto simplificado de conjunto habitacional programado por metodología CCPM.....	63
Figura 42: Comparación de duraciones para proyecto de conjunto habitacional	64
Figura 43: Comparación de duraciones extrapolado para proyecto de conjunto habitacional original.....	64
Figura 44: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.....	65
Figura 45: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.	66
Figura 46: Proyecto de Pique de Acceso y túnel interestación sin simplificar	69
Figura 47: Proyecto de metro simplificado, con asignación de recursos según supuestos	70
Figura 48: Proyecto de metro simplificado con actividades reducidas utilizando criterio P(50)	71
Figura 49: Proyecto de metro simplificado con todos los Buffers insertados	72
Figura 50: Comparación de duraciones para proyecto de metro pique y túnel interestación	73
Figura 51: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.....	74
Figura 52: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.	75
Figura 53: Proyecto de camino simplificado programado por CPM.....	77
Figura 54: Proyecto de camino con duraciones de actividades reducidas y actividades programadas lo más tarde posible.	78
Figura 55: Proyecto de camino programado con CCPM	79
Figura 56: Comparación de duraciones para proyecto de camino	80
Figura 57: Comparación de duraciones para proyecto de camino extrapolado a proyecto completo.....	80
Figura 58: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.....	81
Figura 59: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.	82

1 Introducción

1.1 Introducción al capítulo

En el presente capítulo se exponen temáticas introductorias necesarias para la comprensión del estudio realizado, estos son: contextualización, objetivos, metodología, presentación del método del camino crítico (CPM) y presentación del método de la cadena crítica (CCPM).

1.2 Contextualización

Las empresas desarrollan estrategias para la innovación y desarrollo de nuevos productos, como respuesta a los rápidos avances tecnológicos, la globalización de los mercados y el aumento de la competencia. La necesidad de poner en marcha sus proyectos lo antes posible, hace que la capacidad para acelerar los procesos de diseño y construcción sean factores clave para el éxito del proyecto como negocio.

Sin embargo a pesar de los investigaciones realizadas y de las aportes en torno a la definición y mejora de los procesos de la gestión del tiempo en proyectos, el resultado actual es que la mayoría de las empresas utilizan solo el método del camino crítico CPM y en algunos casos especiales PERT.

En esta memoria se compara el método o enfoque CCPM (Critical Chain Project Management) con el método, más comúnmente utilizado y enseñado, el CPM (Critical Path Method), con el objeto de analizar la real contribución del método CCPM al conocimiento de la gestión del tiempo en proyectos sus desventajas y beneficios con respecto al método CPM.

1.3 Objetivo

Recopilar y presentar los fundamentos y experiencias en el uso del método de la Cadena Crítica (CCPM) en proyectos de Ingeniería y Construcción y comparar con el método más tradicionalmente usado y conocido del Camino Crítico (CPM).

1.3.1 Objetivos específicos

1) Recopilar información del estado del arte del método de la cadena crítica (CCPM) y experiencias reales de uso en proyectos de Ingeniería y Construcción.

- 2) Presentar diferentes cronogramas de proyectos tipo utilizando ambos métodos CCPM y el CPM.
- 3) Analizar las ventajas y desventajas del método de la cadena crítica CCPM en comparación al del camino crítico CPM para cada proyecto tipo.
- 4) Análisis de la aplicabilidad y beneficios del método CCPM a proyectos reales.

1.4 Metodología

El método de la cadena crítica introducido por Goldratt en 1997 proporciona un nuevo enfoque a la gestión del tiempo de los proyectos. Para conocer la aplicabilidad y ventajas de uso de CCPM se utilizará la siguiente metodología:

- a) Revisión bibliográfica de la Teoría de las Restricciones (TOC) génesis, historia y antecedentes.
- b) Revisión bibliográfica a nivel internacional de publicaciones y estudios del CCPM.
- c) Entendimiento del método CCPM a partir de la bibliografía recopilada.
- e) Análisis de las metodologías. Para ello se utilizarán los 8 criterios de comparación identificados en la literatura especializada:
 1. Los objetivos propios de cada método
 2. Enfoque de cada método
 3. Gestión de riesgos
 4. La gestión de los recursos
 5. Enfoque para los problemas de comportamiento humano
 6. La programación de las actividades
 7. Enfoque y metodología para la reprogramación
 8. Los indicadores para el seguimiento del cumplimiento del cronograma
- d) Presentación de proyectos tipo con CCPM y CPM de diferentes tipos de proyectos reales, para esto se utilizará el software Microsoft Project:

Las actividades de los proyectos tipos serán obtenidos a partir de la información de proyectos reales de los cuales se obtendrán las actividades más representativas. Para efectos de esta memoria, los proyectos tendrán como máximo 50 actividades y se utiliza el software Microsoft Project.
- f) Análisis de ventajas y desventajas del CCPM y CPM.

1.5 Descripción del método CPM (Camino Critico)

Los métodos actualmente en uso tiene dos orígenes que son el método PERT (Program Evaluation and Review Technique) y el método CPM (Critical Path Method). Ambos métodos comparten conceptos y metodología, siendo la diferencia principal entre ellos la forma de realizar las estimaciones de las duraciones de las actividades del proyecto. El CPM estima las duraciones de las actividades de manera determinística y el PERT en cambio utiliza estimaciones probabilísticos. (Bibliografía 15)

En el CPM se calcula las fechas teóricas de inicio y finalización tempranas y tardías para todas las actividades, sin considerar las limitaciones de recursos, con un análisis que recorre hacia adelante y hacia atrás toda la red del cronograma. Las fechas de inicio y finalización tempranas y tardías resultantes no constituyen el cronograma final, sino que más bien indican los periodos dentro de los cuales pueden planificarse las actividades, teniendo en cuenta las duraciones de las actividades, las relaciones lógicas, los adelantos, los retrasos y otras restricciones conocidas. (Bibliografía 17)

Las diferencias entre las fechas de inicio y finalización tempranas y las tardías calculadas definen las holguras de cada actividad, cuyo valor puede ser positivo, negativo o nulo. En cualquier camino de la red (secuencia de actividades), la flexibilidad del cronograma se mide por la diferencia positiva entre las fechas tempranas y tardías, lo cual se conoce como "holgura total". Los caminos críticos tienen una holgura total igual a cero o negativa y las actividades del cronograma en ese camino reciben el nombre de "actividades críticas". Las redes pueden tener varios caminos críticos. Puede ser necesario realizar ajustes a las duraciones de las actividades, a sus relaciones lógicas, a los adelantos y a los retrasos, o a otras restricciones del cronograma para lograr caminos de red con una holgura total igual a cero o positiva. Una vez que se ha calculado la holgura total de un camino de red, entonces puede determinarse la holgura libre, que es la cantidad de tiempo que una actividad puede retrasarse dentro de un camino de red, sin demorar la fecha de inicio temprana de cualquier actividad sucesora inmediata dentro de dicho camino de red. (Bibliografía 1)

El Método del Camino Critico consta de dos ciclos. El primero, de planificación y programación del proyecto, comprende la generación de la lista de actividades, matriz de secuencias, matriz de tiempos, red de actividades, asignación de recursos, costos y nivelación de recursos. El segundo, de seguimiento y control de la ejecución del proyecto, incluye, como procesos principales, el informar del trabajo realizado, controlar el cronograma y controlar los costos y plazos. (Bibliografía 15)

1.5.1 Método CPM

La aplicación del CPM requiere confeccionar una malla o red de las actividades. En esta memoria se utilizará la nomenclatura de actividad en el nodo.

Cada actividad puede tener las siguientes relaciones de precedencia:

Final-Comienzo (FC): una actividad B sólo se puede iniciar si la actividad A está terminada.

Final-Final (FF): las actividades A y B deben terminar simultáneamente.

Comienzo-Comienzo (CC): las actividades A y B deben iniciarse simultáneamente.

Comienzo-Final (CF): una actividad B sólo se puede finalizar luego de ser iniciada otra actividad A.

Para definir el tipo de precedencia entre actividades se requiere de una cierta cuota de experiencia profesional en el área, en proyectos afines.

Se utiliza la siguiente nomenclatura para un nodo:

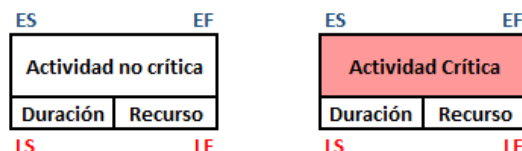


Figura 1: Nomenclatura para un nodo en malla CPM

Cada nodo contiene la siguiente información sobre la actividad:

- Nombre de la actividad
- Duración esperada de la actividad (t)
- Tiempo de inicio más temprano (ES = Earliest Start)
- Tiempo de término más temprano (EF = Earliest Finish)
- Tiempo de inicio más tardío (LS = Latest Start)
- Tiempo de término más tardío (LF = Latest Finish)
- Holgura de la Actividad (H)

Para dibujar la malla de red se deben seguir los siguientes principios

Principio de designación sucesiva: se nombra a los nodos según los números naturales, de manera que no se les asigna número hasta que han sido nombrados todos los nodos que van a parar a ellos.

Principio de unicidad del estado inicial y el final: se prohíbe la existencia de más de un nodo inicial o final. Sólo existe una situación de inicio y otra de terminación del proyecto.

1.5.1.1 Cálculo de los tiempos de inicio y término más tempranos

El tiempo de inicio más temprano “ES” (Early Start) y de término más temprano “EF” (Early finish) para cada actividad del proyecto, se calculan desde el nodo de inicio hacia el nodo de término del proyecto.

La duración esperada del proyecto (T) es igual al mayor de los tiempos EF de todas las actividades que desembocan en el nodo de término del proyecto.

1.5.1.2 Cálculo de los tiempos de inicio y término más tardíos

El tiempo de inicio más tardío “LS” (Latest Start) y de término más tardío “LF” (Latest finish) para cada actividad del proyecto, se calculan desde el nodo de término retrocediendo hacia el nodo de inicio del proyecto según la siguiente relación:

$$LS = LF - t$$

Donde (t) es el tiempo esperado de duración de la actividad y donde LF queda definida según la siguiente regla del tiempo de término más tardío.

El tiempo de término más tardío, LF, de una actividad específica, es igual al menor de los tiempos LS de todas las actividades que comienzan exactamente después de ella. El tiempo de término más tardío de las actividades que terminan en el nodo de término del proyecto es igual a la duración esperada del proyecto (T).

1.5.1.3 Holguras

La Holgura de una actividad, es el tiempo que tiene ésta disponible para, ya sea, atrasarse en su fecha de inicio, o bien alargarse en su tiempo esperado de ejecución, sin que ello provoque retraso alguno en la fecha de término del proyecto.

La holgura de una actividad se calcula de la siguiente forma:

$$H = LF - EF$$

o bien

$$H = LS - ES$$

1.5.1.4 Holgura total (HT)

La holgura total es el intervalo durante el cual una actividad, que se inicia a partir de las fechas más tempranas, se puede desplazar hacia el futuro sin que se vean afectadas las fechas más tardías de las actividades sucesoras o la fecha final extrema del grafo. La holgura total puede ser menor que, mayor que o igual a cero (holgura total = fin más tardío - fin más temprano). Si las fechas más tempranas y más tardías de una operación coinciden en el mismo día, la holgura total será cero. Las actividades con la holgura total menor se denominan "críticas". El camino crítico es el camino a través del grafo en el que se ordenan las operaciones y sus relaciones de ordenación de manera que la holgura total es mínima.

1.5.1.5 Holgura libre (HL)

La holgura libre es el intervalo durante el cual una actividad, que se inicia a partir de las fechas más tempranas, se puede desplazar hacia el futuro sin que se vean afectadas las fechas más tempranas de las operaciones sucesoras o la fecha de fin extrema del grafo. La holgura libre no puede ser inferior a cero ni mayor que la holgura total. El sistema calcula primero la fecha de inicio más temprana para todas las operaciones sucesoras y resta el intervalo de la relación de ordenación.

1.5.1.6 Actividades críticas

Se denomina actividades críticas a aquellas actividades cuya holgura es nula o negativa y que por lo tanto, si se retrasan en su fecha de inicio o se alargan en su ejecución más allá de su duración esperada, provocarán un retraso exactamente igual en la fecha de término del proyecto.

1.5.1.7 Caminos críticos

Se denomina caminos críticos a los caminos continuos entre el nodo de inicio y el nodo de término del proyecto, cuyos aristas componentes son todas actividades críticas. Las rutas críticas se nombran por la secuencia de actividades críticas que la componen o bien por la secuencia de nodos por los que atraviesa. Nótese que un proyecto puede tener más de un camino crítico pero a lo menos tendrá siempre uno.

1.5.2 Ejemplo de malla

A continuación se presenta una malla de 11 actividades, para concretar el proyecto se dispone de 30 días. En la Tabla 1 se muestran las actividades, sus duraciones y las relaciones lógicas.

Actividad	Duración (días)	Relación Lógica
Inicio		
A	2	FC Inicio
B	6	CC A + 1 día
C	3	CC B
D	5	FC A
E	2	FC A ; FC B ; FC C
F	1	FC C ; CF E
G	8	FC D ; FC E
H	3	FC E ; FF G + 4 días
I	5	FC F ; CC H
J	4	FC H ; FC I -1 día
K	2	FC J
Término		FC K

Tabla 1 : Actividades para malla típica.

Diagrama de la Malla de red

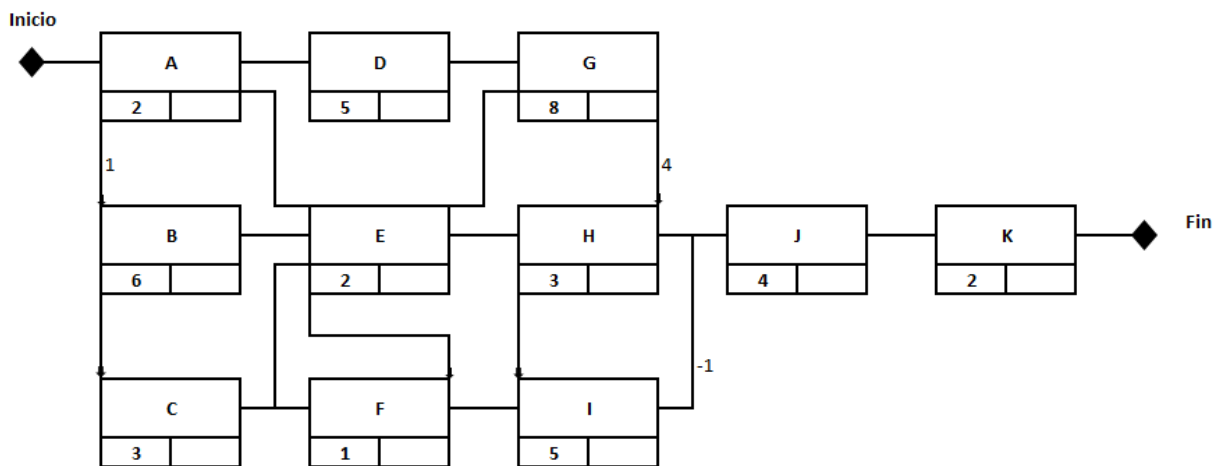


Figura 2: Malla CPM

Solucionando la malla por la metodología CPM se obtiene:

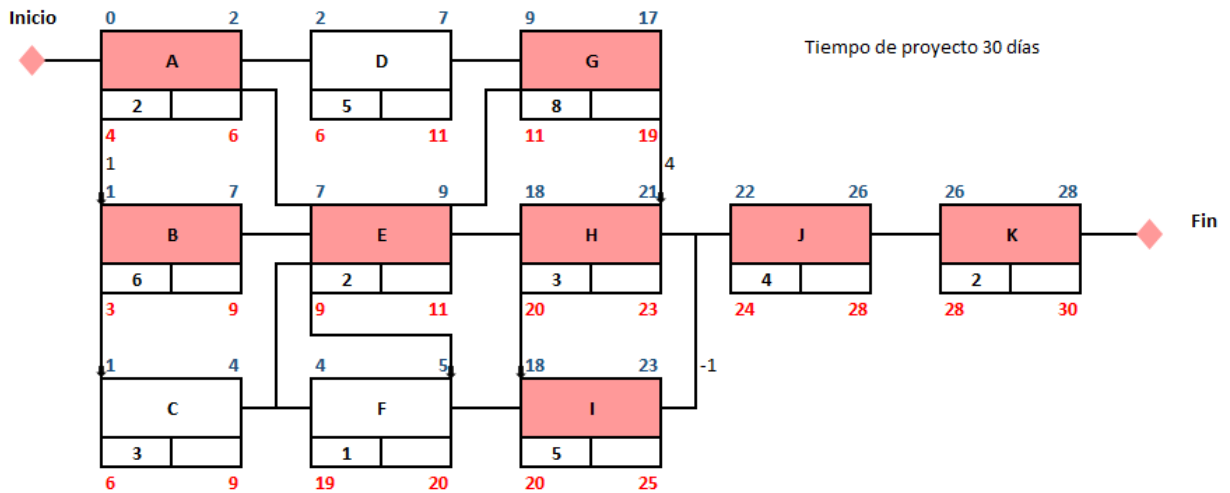


Figura 3: Malla CPM resuelta

Las actividades en rojo representan actividades críticas, en este caso existen 6 caminos críticos que se detallan a continuación:

- A-E-G-H-J-K
- A-E-H-J-K
- A-E-I-J-K
- A-B-E-G-H-J-K
- A-B-E-H-J-K
- A-B-E-I-J-K

1.5.3 Metodologías y Herramientas de apoyo complementarias al CPM

1.5.3.1 PERT

El método PERT es una técnica para analizar la incertidumbre en los plazos de proyectos, considerando duraciones probabilísticas para las actividades a diferencia de las duraciones determinísticas que utiliza el método CPM.

El método PERT considera que la duración esperada de una actividad es una variable aleatoria de distribución de probabilidad Beta Unimodal de parámetros (a, m, b) donde:

t_a = Se define como la duración optimista al menor tiempo que puede durar una actividad.

t_m = Es la duración más probable que podría durar una actividad.

t_b = Es la duración pesimista, o el mayor tiempo que puede durar una actividad.

t_e = Corresponde a la duración esperada para una actividad.

El valor (duración) esperado en esta distribución de probabilidad Beta se expresa en la siguiente fórmula y su desviación estándar es:

$$t_e = \frac{t_a + 4 t_m + t_b}{6}$$

$$Sd = \frac{t_b - t_a}{6}$$

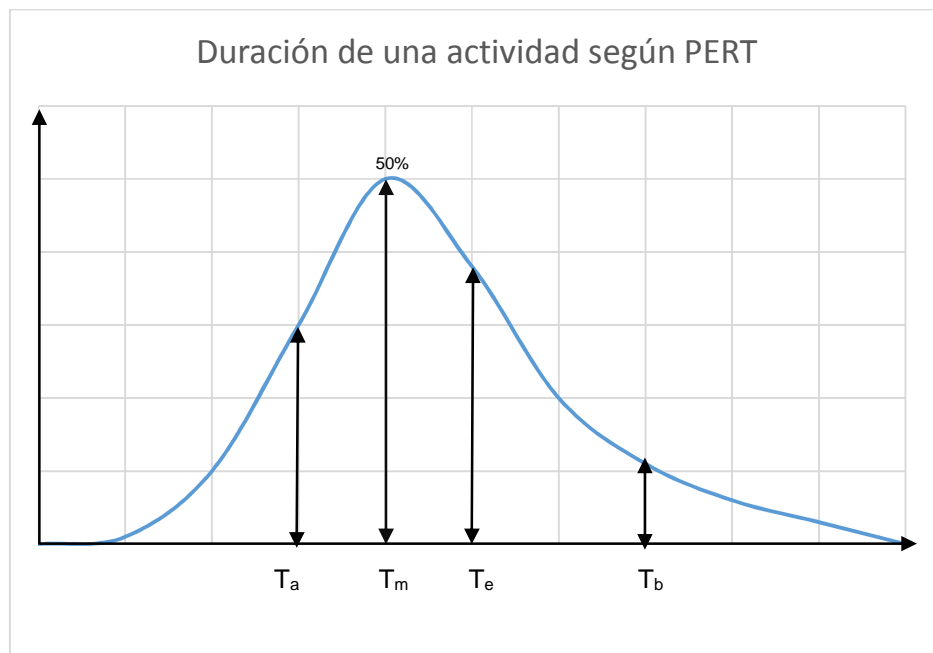


Figura 4: Duraciones PERT

Se calcula para cada actividad del proyecto la duración esperada y la desviación estándar, luego se aplica el teorema del límite central al total de actividades esto permite considerar que la duración total del proyecto seguirá una distribución normal. Una vez conocida la distribución normal se puede calcular la distribución de probabilidad de la duración total del proyecto.

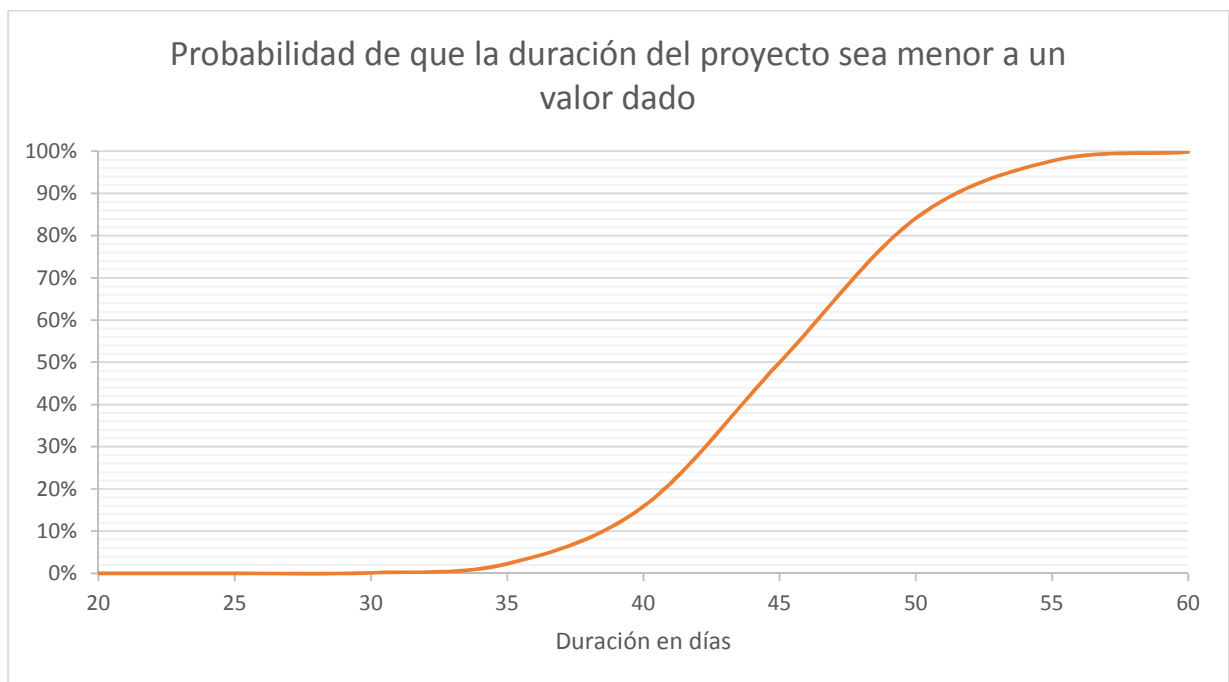


Figura 5: Curva de Probabilidad de duraciones de PERT

Como se observa en la Figura 5, la probabilidad de que la duración de la actividad dure menos que 30 días es 0%, y la probabilidad de que la duración dure menos que 60 días es 100%, es decir que la duración del proyecto sea mayor que 60 días es 0%.

1.5.3.2 Simulación de Montecarlo

El método de Montecarlo es un método no determinístico o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método de Montecarlo proporciona soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas matemáticos posibilitando la realización de experimentos con muestreos de números pseudoaleatorios en una computadora. Se aplica un modelo matemático a la situación incierta y se calcula el resultado para diferentes posibilidades. Se supone un comportamiento aleatorio de la(s) variable(s), aunque no lo sean.

El uso del Método de Montecarlo en la programación del proyecto consiste en calcular para diferentes escenarios probables, las diferentes duraciones asociadas y con ello, la distribución de probabilidad de la duración total. El teorema del límite central permite considerar esta distribución como normal. Idealmente se trabaja con alrededor de 10.000 simulaciones.

Con este método se obtiene una curva de probabilidad de cumplimiento de plazo de manera similar al PERT, la diferencia es que se usan simulaciones asociadas a distribuciones de probabilidad de las duraciones de diferentes tipos (triangular, normal, beta modificada, entre otras).

1.5.3.3 Fast Tracking (Ejecución Rápida)

Esta es una técnica de aceleración del cronograma del proyecto que cambia la lógica normal de la red para traslapar actividades que en general se realizarían en forma secuencial, tales como la fase de diseño y la fase de construcción, o incluso para llevar a cabo actividades del cronograma en forma paralela.

Esta técnica permite reducir la duración planificada del proyecto, sin embargo se deben considerar los mayores riesgos y costos asociados.

1.5.3.4 Crashing (Compresión)

Es una técnica de aceleración del cronograma que consiste en reducir las duraciones de las actividades críticas con el aumento de la asignación de recursos para dichas actividades del cronograma. Esta técnica tiene la limitación de que las actividades tienen una duración mínima (rotura) posible técnicamente. Usualmente esta técnica aumenta el costo del proyecto por uso de recursos más costosos, turnos extras, sobretiempo.

1.5.3.5 Resource Leveling (Nivelación de Recursos)

La nivelación de recursos es una técnica de análisis de la red del cronograma que se aplica a un cronograma que requiere mayores recursos de los disponibles o su utilización es “dispareja” en el tiempo. La nivelación de recursos puede utilizarse cuando los recursos compartidos o críticos necesarios sólo están disponibles en ciertos momentos o en cantidades limitadas, o para mantener la utilización de recursos en un nivel constante. La nivelación de recursos es necesaria cuando los recursos han sido sobre asignados, es decir, cuando un recurso se ha asignado a dos o más tareas para el mismo periodo, o cuando los recursos compartidos o críticos necesarios sólo están disponibles en ciertos periodos o en cantidades limitadas. La nivelación de recursos provoca a menudo cambios en la ruta crítica.

Ejemplo:

Luego de programar un proyecto, se tiene que el consumo de recursos a través del tiempo se muestra en la Tabla 2.

Suponiendo que el límite de consumo de recursos del proyecto es 5 unidades por día, es necesario nivelar los recursos. En la Figura 6 se muestra el Histograma de consumo de recursos por día del proyecto sin nivelar.

Día	Recursos/día
1	2
2	2
3	7
4	3
5	2
6	4
7	7
8	7
9	5
10	2
Total de recursos	41

Tabla 2: Consumo de recursos de un proyecto

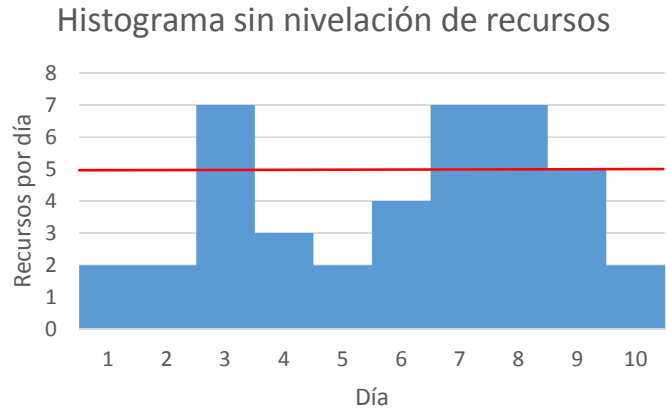


Figura 6: Histograma sin nivelación de recursos

En la Tabla 3 se muestra el histograma de consumo de recursos para el mismo proyecto, pero con los recursos nivelados.

Luego de aplicar la técnica ahora se cumple con la restricción.

Día	Recursos/día
1	2
2	4
3	5
4	3
5	4
6	4
7	5
8	5
9	5
10	4
Total de recursos	41

Tabla 3: Consumo de recursos nivelado

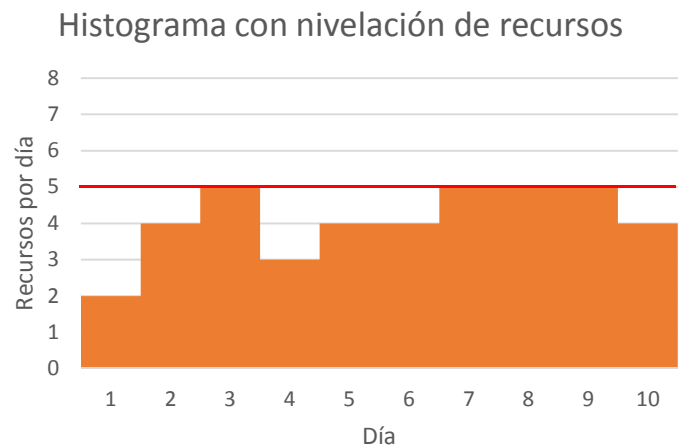


Figura 7: Histograma con nivelación de recursos

1.5.4 Debilidades del método CPM

A partir del análisis realizado de datos expuestos por Standish Group y otras publicaciones de casos reales de gestión de proyectos, y de las reflexiones y observaciones de algunos autores como Shonberger y Goldratt, se destacan 6 efectos indeseables (debilidades) en la utilización del método del Camino Crítico:

1.5.4.1 Las variaciones en las estimaciones de las duraciones

Con objeto de intentar asegurar el término de la tarea en la fecha prevista, normalmente se estiman duraciones de ejecución de actividades altamente probables, dando lugar a que la estimación “segura” de la duración con una probabilidad de realización de la actividad de un 90%.

1.5.4.2 El síndrome del estudiante

Existen comportamientos que tienden a consumir los márgenes de seguridad e incitan a realizar la mayor parte del trabajo al final del tiempo programado. Se realiza menos de un tercio del trabajo durante los dos primeros tercios del tiempo y durante el último tercio el trabajo faltante. La consecuencia final es que ante cualquier incidencia o problema, no queda tiempo para resolverlo sin que se afecte la fecha fin de la tarea.

1.5.4.3 La imposibilidad de aprovechar las variaciones positivas

Existe una cultura sugestionada por las fechas y los hitos, de modo que aún terminándose una tarea antes de su fecha fin, el trabajo no se entrega hasta la fecha prevista.

1.5.4.4 Los retrasos consecuencia de las dependencias de las tareas

En un proyecto suele haber varios caminos que se unen hacia el fin del proyecto. El retraso en uno de ellos provoca que, aunque el resto termine en plazo, la tarea siguiente se retrase. En definitiva, cuando varios caminos se integran para dar lugar a otro, se pierden las variaciones positivas en tiempo y se transmiten los retrasos.

1.5.4.5 La multitarea

La multitarea es la realización de múltiples actividades del proyecto “al mismo tiempo”. En la práctica los seres humanos no son buenos para realizar dos actividades al mismo tiempo. En general la gente realmente funciona realizando multitarea dividiendo el tiempo entre las actividades. Esto podría hacerse durante el transcurso del día un proyecto en la mañana y otro por la tarde.

La mayoría de las personas piensa que la multitarea es una buena forma de mejorar la eficiencia. Esto asegura que todo el personal se encontrará ocupado todo el tiempo. En la práctica a menudo sucede que algún input para la realización de una tarea se retrasa por lo cual se pasa a otra actividad. Desde este punto de vista la multitarea hace un buen uso del tiempo.

Goldratt (1984) demostró que el enfocarse en la eficiencia local puede perjudicar el rendimiento global de un sistema. Un ejemplo de este fenómeno de suboptimización sería por ejemplo la utilización de robots que operan todo el tiempo con la finalidad de obtener un alto grado de eficiencia. En este caso se puede producir un exceso de inventario no necesario para las solicitudes de los clientes. Esto incrementa los costos operacionales no dejando beneficios positivos para la compañía como un todo.

La multitarea en las actividades en un proyecto puede llegar a tener un efecto mucho peor. Considere una persona que hace actividades que duran una semana para tres proyectos diferentes. Si la persona se le permitiera trabajar exclusivamente en cada una, el primer proyecto lo tendría listo en la primera semana, el segundo en la segunda semana y el tercero en la tercera semana. Sin embargo, si las actividades se realizan de manera simultánea, en donde el trabajador avanza un tercio de cada actividad por semana, recién tendría listas las tres actividades al final de la tercera semana. Todas las 3 actividades tendrán una duración de 3 semanas, potencialmente extendiendo la duración de cada proyecto individual.

Si la multitarea es una forma normal en una compañía de negocios, tres semanas se vuelve la duración normal de la actividad. Luego en el historial de la compañía de negocios se almacena que esa actividad tiene una duración de tres semanas, es decir una duración sobreestimada. Si esta actividad pertenece al camino crítico, en la práctica extiende directamente la duración del proyecto.

La mayoría de las compañías reconoce que fomentan la multitarea.

1.5.4.6 La pérdida de atención al CPM

Existen diversos aspectos que influyen en la dificultad del director del proyecto para centrarse en los aspectos importantes que permiten alcanzar los objetivos del proyecto. Un exceso en los niveles de actividad y responsabilidad tiene como efecto la pérdida de atención en las actividades críticas del proyecto y por ello en el cumplimiento de plazo y por ello en el cumplimiento de plazo.

1.6 Descripción del Método CCPM

El CCPM se basa en tres herramientas teóricas que se utilizan para mitigar los seis efectos indeseables anteriormente descritos para el CPM:

- Teoría de las Restricciones (TOC), expuesta por primera vez en 1984 (Goldratt, 1984);
- Variación de Causa Común
- La ley estadística de la agregación y el teorema del límite central

Al igual que en el método del Camino Crítico, el método de la Cadena Crítica se compone de dos fases:

La primera, de planificación y programación del proyecto, implica: listar actividades, establecer la secuencia de actividades, reducir las actividades eliminando márgenes de seguridad (Goldratt, 1997) e insertarlos mediante un sistema de buffers (actividades ficticia que no utilizan recursos y tienen como propósito proteger la fecha de entrega del proyecto, estos serán definidos mas adelante), identificar la cadena crítica, explorar la limitación (Leach, 2005), subordinar las cadenas de actividades a la cadena crítica mediante buffers de alimentación actividades, superar la restricción del sistema, iterar, e insertar buffer de coste (Leach, 2005).

La segunda fase es la de seguimiento y control se apoya en los reportes o actualizaciones del estado del proyecto y la gestión de los buffers fundamentalmente. El papel de un buffer es absorber las variaciones de duración de las actividades que lo preceden. Así, el buffer del proyecto absorbe las variaciones en las actividades de la cadena crítica, el buffer de alimentación absorbe las variaciones en las actividades no críticas y el buffer de recurso, las variaciones en las actividades no críticas de un recurso cuando la actividad siguiente de este recurso es una actividad crítica. La fase de seguimiento y control comprende: el informe del trabajo realizado, el control de los plazos mediante la gestión de del buffer del proyecto y de los buffers de alimentación.

En la Figura 8 se muestran dos actividades secuenciales con duración pesimista de la metodología CPM en donde un 90% de nivel de confianza en el cumplimiento de las actividades, esto en la práctica se hace añadiendo una duración adicional a cada una de las actividades. La metodología CCPM evita esto, al trabajar con duraciones de actividades reducidas (50% de nivel de confianza según literatura) y añadiendo distintos tipos de Buffers.

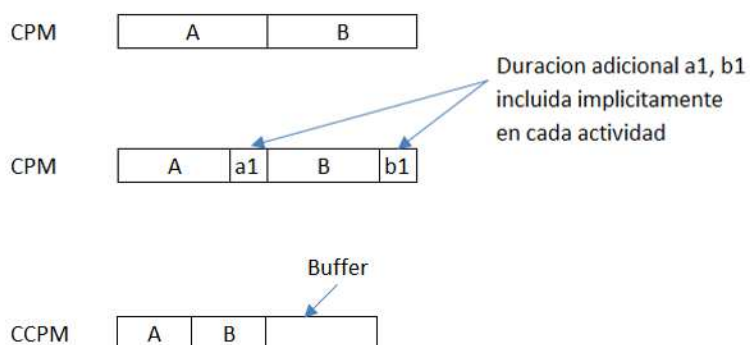


Figura 8: Ejemplo de dos actividades secuenciales

1.6.1 Fundamentos teóricos

EL CCPM se basa en la teoría de las restricciones (TOC-Theory Of Constraints), lo que le distingue de los métodos CPM/PERT. La aplicación de la TOC supone que diversos conceptos que pertenecen al ámbito de la gestión de la producción industrial se han adaptado al ámbito de la gestión de proyectos, como por ejemplo, los conceptos cuello de botella, limitación, y dependencias de los recursos. En el método del Camino Crítico se consideran los problemas de capacidad de los recursos, pero la aplicación de la TOC implica considera las dependencias entre los recursos. Otro concepto que le aporta diferencias y está relacionado con las variaciones es el buffer. El buffer protege la limitación frente a las variaciones.

La aplicación de la TOC al ámbito de la gestión de proyectos implica la adquisición de algunos conceptos, que fundamentalmente no son nuevos pero que tienen un carácter “novedoso” dado que se no utilizan frecuentemente en el ámbito de la planificación y control de proyectos.

1.6.1.1 Teoría de las Restricciones (TOC)

La Teoría de las restricciones dice que todo sistema tiene una restricción que limita su productividad. Esto se puede probar ya que si no existiesen restricciones la productividad del sistema podría ser infinita. Es por esto que las restricciones limitan todos los sistemas a un flujo de productividad distinto de infinito. Generalmente se reconocen las restricciones del sistema como un “cuello de botella”, una restricción que limita el flujo a través del sistema.

1.6.1.2 Variación de Causa Común

Es una fuente de variación que es inherente al sistema, previsible y evitable (corresponde a gran parte de las variaciones del sistema). En un diagrama de control, aparece como parte de la variación del proceso al azar (es decir, la variación de un proceso que se podría considerar normal o no inusual) y se indica por medio de un patrón de puntos al azar dentro de los límites de control. También se la conoce como causa al azar. (Bibliografía 15)

1.6.1.3 Variación de Causa Especial

Es una fuente de variación del sistema, que obedece a causas circunstanciales y fallas esporádicas o temporales. Esta variación se caracteriza por ser:

Fenómeno nuevo, sin anticipar, emergente o previamente ignorado dentro del sistema; Variación inherente impredecible, incluso probabilísticamente; Variación fuera de la base de experiencia histórica.

1.6.1.3 Ley estadística de la agregación

Establece que la varianza de un proyecto es la suma de las varianzas de las actividades individuales. (Bibliografía 13)

1.6.1.4 Teorema del límite central

El teorema del límite central o teorema central del límite indica que, en condiciones muy generales, si S_n es la suma de n variables aleatorias independientes, entonces la función de distribución de S_n «se aproxima bien» a una distribución normal (también llamada distribución gaussiana, curva de Gauss o campana de Gauss). Así pues, el teorema asegura que esto ocurre cuando la suma de estas variables aleatorias e independientes es lo suficientemente grande.

1.6.2 Conceptos CCPM

1.6.2.1 Cadena

Rama de secuencia de actividades que pueden tener las mismas dependencias planteadas en el método CPM.

1.6.2.2 Cadena Crítica

Es la cadena más larga del proyecto, puede estar alimentada por cadenas más pequeñas.

1.6.2.3 Buffer

Actividad ficticia con duración mayor a cero, que no requiere recursos.

1.6.2.4 Project Buffer

Buffer que se inserta al final de la cadena crítica, como tiempo adicional.

1.6.2.5 Feeding Buffer

Buffer que se inserta al final de las cadenas que alimentan a la cadena crítica, como tiempo adicional.

1.6.2.6 Resource Buffer

Es un Buffer que alerta cuando un recurso será ocupado a lo largo de la cadena crítica. Esta notificación es necesaria debido a que en CCPM no existen fechas asociadas con cada actividad, estas van cambiando en la medida que se ocupan los Buffers.

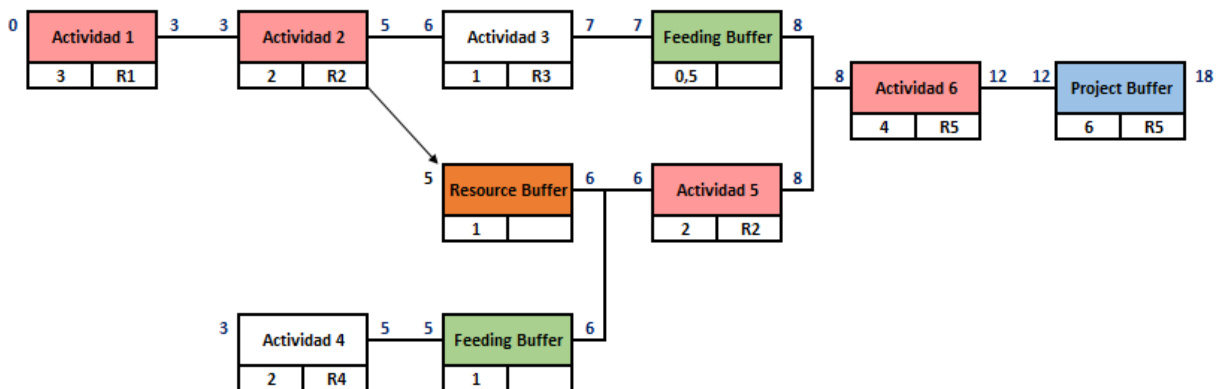


Figura 9: Diagrama de red CCPM en donde se utilizan todos los Buffers

1.6.3 Criterio de reducción de estimación de duraciones de actividades “Criterio P(50)”

La metodología hace reducciones en las duraciones estimadas para las actividades. Estas reducciones de tiempo son las que se consideran para el dimensionamiento de los buffers.

Este criterio (de ahora en adelante “Criterio P(50)”) trabaja con duraciones de actividades reducidas al 50% de duración de la estimación pesimista utilizada en CPM, según las bibliografías Critical Chain a business novel, Critical Chain Second Edition, Critical Chain Buffer Sizing entre otras. El considerar el 50% de la duración es equivalente a un 50% de nivel de confianza en la duración promedio de las actividades si tienen una distribución normal. La correcta aplicación de este criterio requiere de la experiencia por parte del programador, pues no necesariamente aplica para todas las actividades, ya que algunas pueden tener duraciones o rendimientos subestimados, esto implica que una o más actividades pueden ser reducidas a duraciones superiores al 50% de la original llegando incluso a no reducirse.

1.6.4 Proceso de programación CCPM

Según el texto Critical Chain Project Management Second Edition capítulo 6.1 se tiene que el proceso es el siguiente:

Los pasos básicos para el proceso de programación de un proyecto, asumiendo que no se utiliza un programa computacional especial para la cadena crítica, son los siguientes:

Etapa 1: Identificar la Cadena Crítica

- 1.1. Crear un Lay out de la red de actividades con fechas tardías. Reducir la duración de las actividades utilizando el Criterio P(50).
- 1.2. Si no existe dependencia de recursos ir al paso 1.6.
- 1.3. Identificar la restricción que se resolverá primero, esta debería ser la restricción que produce el cuello de botella, o la más conflictiva. Si muchas restricciones presentan el mismo potencial de conflicto, se elige la última.
- 1.4. Remover la restricción de recursos reprogramando las actividades antes. (No preocuparse de crear nuevos conflictos en este paso, estos se resolverán en la siguiente secuencia)
- 1.5. Volver al final de la programación y seguir el paso 1.4 para la siguiente restricción de recursos. Al ir resolviendo los conflictos para las siguientes restricciones, se deben mantener las modificaciones anteriores. Repetir hasta resolver todos los conflictos.
- 1.6. Identificar la cadena crítica como la cadena más larga de eventos dependientes.

Etapas 2: Análisis de la Cadena Crítica.

- 2.1. Revisar la planificación para determinar si la re secuenciación puede acortar la duración total del proyecto. Si se permite, hacerlo.
- 2.2. Añadir el buffer de proyecto al final de la Cadena Crítica.

Etapas 3: Subordinar las otras actividades, rutas y recursos a la cadena crítica.

- 3.1. Proteger la cadena crítica mediante el uso de Feeding Buffers a todas las cadenas que alimentan la cadena crítica. Dimensionar estos Buffers usando la ruta más larga antes del Buffer. (Nota: todas las cadenas no críticas alimentan la cadena crítica para completar el proyecto. Si algunas cadenas van directamente al buffer de proyecto, estas necesitan Feeding Buffers)
- 3.2. Resolver cualquier restricción de recursos creada por la adición de los Feeding Buffers adelantando las actividades pertenecientes a esta cadena.
- 3.3. Adelantar cualquier actividad dependiente de actividades que han sido movidas en el paso 3.2.

Etapas 4: Acortar el plazo de entrega del proyecto mediante el uso de recursos adicionales para disminuir la restricción de ventanas de tiempo.

Etapa 5: Insertar Resource Buffer entre las actividades que utilicen el mismo recurso.

Etapa 6: Volver al paso uno. No permitir que la inercia de las iteraciones se convierta en restricción.

Esta metodología puede utilizarse para proyectos pequeños y para proyectos medianos a grandes con muchas actividades existen softwares especializados.

“Good Enough”: (Suficientemente bueno)

Es una idea importante en el desarrollo de proyectos con CCPM. Por razones matemáticas, es imposible construir un algoritmo preciso de optimización para la nivelación de recursos. El procedimiento para desarrollar una planificación con CCPM asegurar que esta será lo suficientemente buena. Esto significa que el tiempo total de proyecto será, con una pequeña parte de la longitud del buffer de proyecto, cercano a la planificación óptima. Esto en la realidad tendrá muchos cambios debido a los supuestos realizados, y no se puede predecir explícitamente los resultados de las variaciones estadísticas, es por esto que se usa el concepto “Good Enough”. (Ref. 6)

A continuación en la Figura 10 y la Figura 11 se presenta un diagrama de flujo de la metodología anteriormente expuesta.

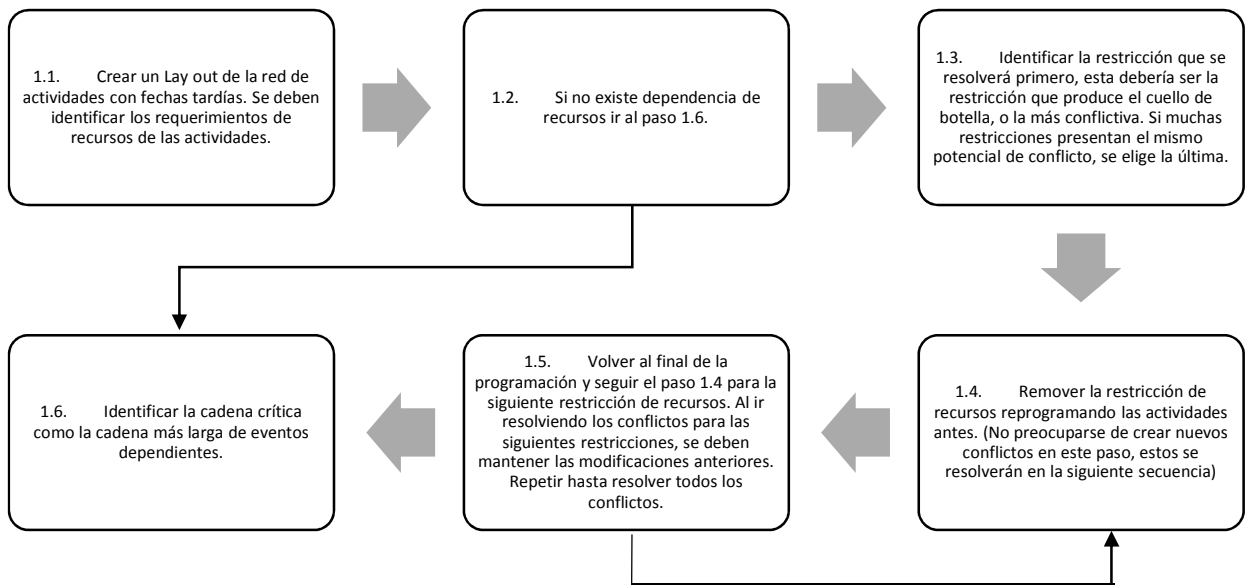


Figura 10: Diagrama de flujo para la primera etapa de la metodología CCPM

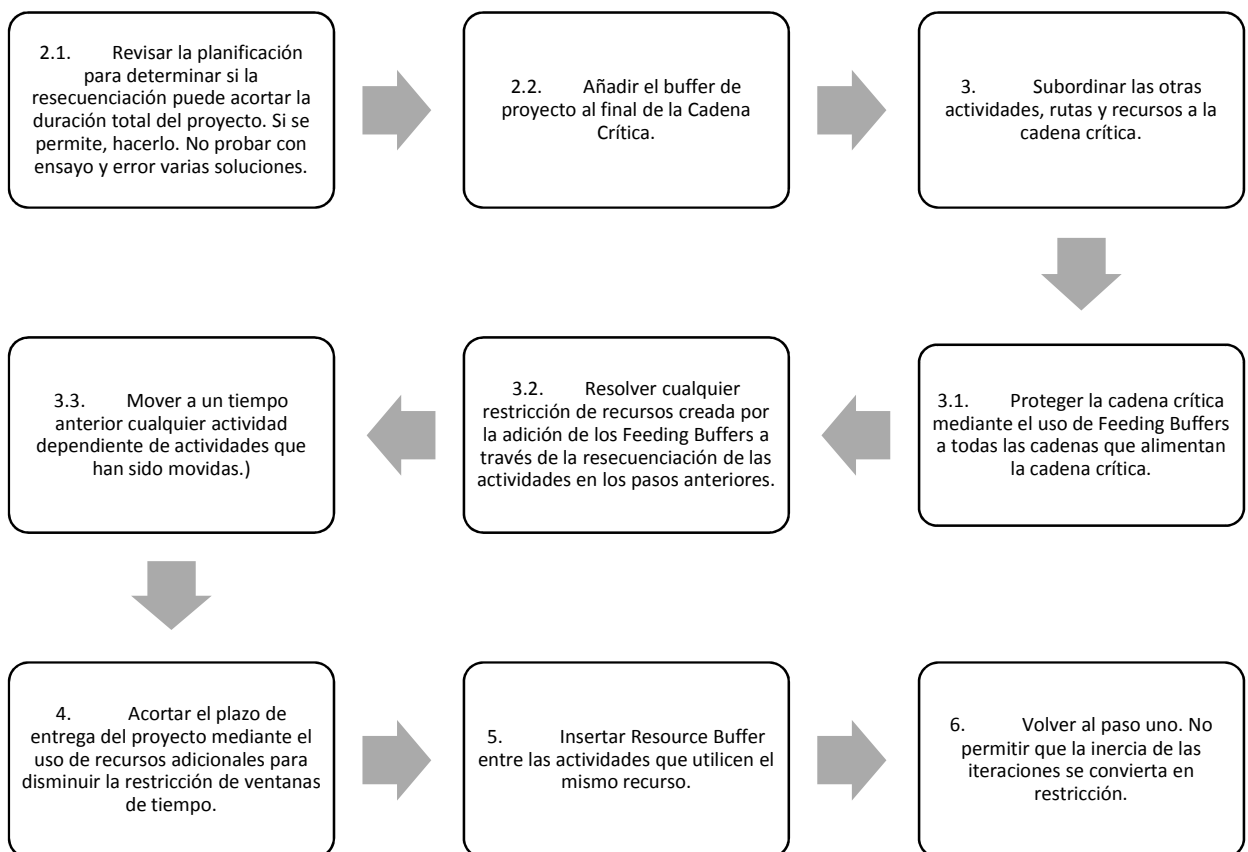


Figura 11: Diagrama de flujo para Etapas 3, 4, 5 y 6 de la metodología CCPM

1.6.5 Dimensionamiento de Buffers

1.6.4.1 Dimensionamiento para Project Buffer y Feeding Buffer

Existen varios métodos para determinar el tamaño de los Buffers. Entre ellos destacan los siguientes:

Método 1: 50% de la duración de la Cadena

Este método suma la duración de una cadena y determina el tamaño del Buffer como la mitad del total. No se debe contar los espaciamentos entre actividades. Para las cadenas que alimentan la cadena superior, se debe considerar la cadena de más larga duración.

Este método tiene dos fortalezas: es simple y usualmente provee un Buffer de tamaño adecuado. La principal debilidad de este método es que no permite conocer explícitamente la variabilidad de las actividades. Este método además crea Buffers de duración relativamente largas, que en algunos casos son difíciles de justificar.

$$Buffer = 0.5 \sum_{i=1}^n (d_i - Tr_i)$$

En donde:

n : es el número de actividades pertenecientes a la Cadena

d_i : es la duración de la actividad i

Tr_i : es la reducción de la duración de la actividad i

Método 2: SSQ Square Root of the Sum of the Squares

El método SSQ usa información de bajo riesgo de la duración media para cada actividad en la cadena. Esto se dimensiona como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la diferencia entre las duraciones estimadas de las actividades antes de utilizar el criterio P(50) y después. Como el método para las cadenas de alimentación para las ramas ascendentes, usa solamente la cadena más larga o el resultado mayor de cada cadena.

La primera ventaja de este método es que permite la utilización de la variación conocida de cada actividad. Una desventaja es que esto podría conducir a Buffers de tamaño menor al deseado para cadenas largas.

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

En donde:

n : es el número de actividades pertenecientes a la Cadena

U_i : es la duración de la actividad i antes de utilizar el criterio P(50)

L_i : es la duración de la actividad i después de utilizar el criterio P(50)

Método 3: Bias Plus SSQ

Este método combina los dos anteriores, usando un Buffer ajustado a la cantidad de información disponible para las variaciones, sumado con el método SSQ para dar cuenta de una variación de causa común. Esta cantidad ajustada usualmente será asignada como menos del 50% de la cadena.

1.6.4.2 Dimensionamiento para Resource Buffers

Goldratt recomienda la utilización de un Buffer de recursos para ayudar a anticipar la utilización de recursos en una actividad a lo largo de la cadena crítica. Debido a que la metodología no trabaja con fechas definidas y la utilización de los recursos debe ser planificada con anterioridad, los Resource Buffers actúan como notificaciones que indican cuando un recurso esta por ser utilizado en otra actividad. El dimensionamiento de este buffer corresponde al 50% de la duración de la actividad reducida con el criterio P(50).

1.6.6 Ejemplo 1: Malla simple

Se tiene el siguiente proyecto de 5 actividades programado por CPM con las fechas tempranas (las actividades críticas son mostradas con color rojo) con una duración total de 80 días:

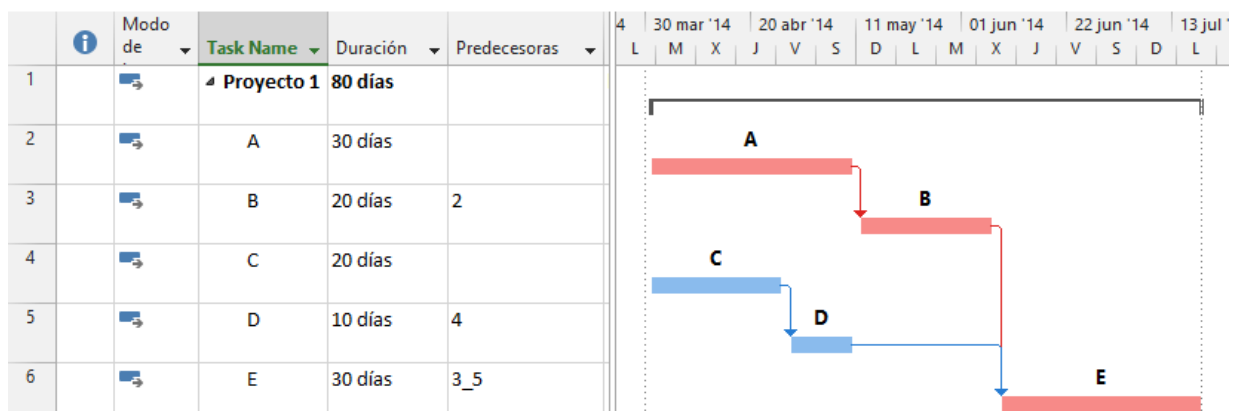


Figura 12: Proyecto programado con fechas tempranas

Siguiendo el procedimiento, se reduce la duración de las actividades siguiendo el criterio P(50) y se reprograma el proyecto con las fechas tardías (ahora todas las actividades son críticas).

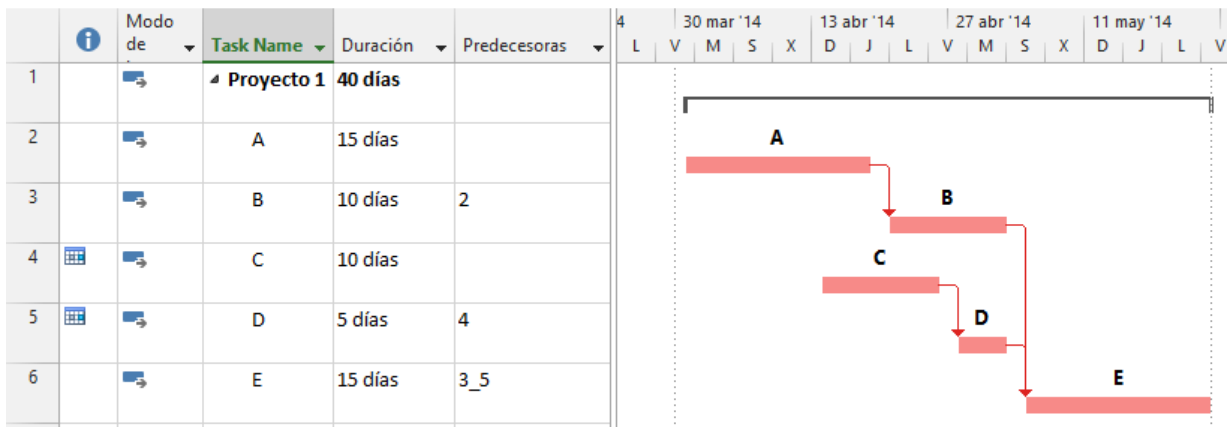


Figura 13: Primer paso, crear la cadena crítica al reducir la duración de las actividades y programar con fechas tardías

En la siguiente figura, se añade el Project Buffer y el Feeding Buffer. Debido a que no hay dependencia de recursos, no se añade Resource Buffer en este caso.

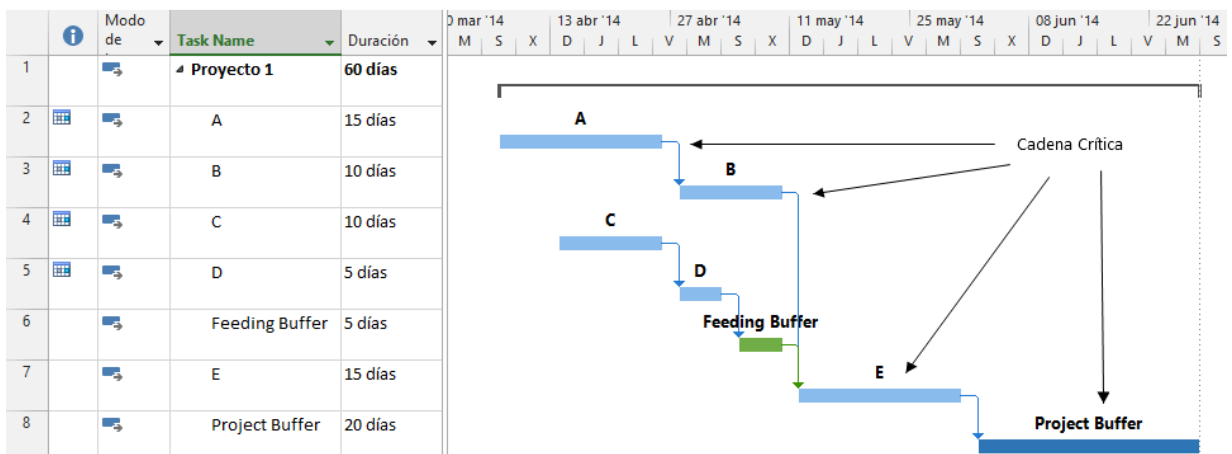


Figura 14: Al no existir restricción de recursos, no se añade Resource Buffer

Entonces al aplicar CCPM la duración del proyecto es 40 días con un buffer de 20 días, total 60 días y con un Feeding Buffer entre la actividad D y E de 5 días.

1.6.7 Ejemplo 2: Malla simple con restricción de recursos

Ahora se considerará el mismo proyecto de 5 actividades, pero con restricción de recursos. A continuación se muestra la carta Gantt ya con los inicios tardíos y utilizando el criterio P(50). Los recursos son representados de la siguiente forma R1, R2, R3 y R4.

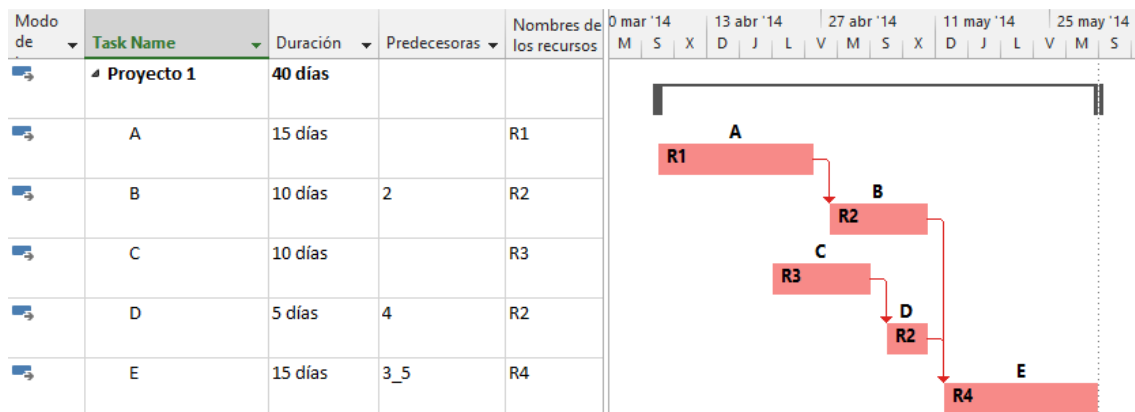


Figura 15: El mismo proyecto, esta vez con restricción de recursos

Siguiendo la metodología se debe remover el conflicto de recursos (R2) desde las actividades más cercanas al término del proyecto hacia las más tempranas. A continuación se presentan dos alternativas.

Alternativa A

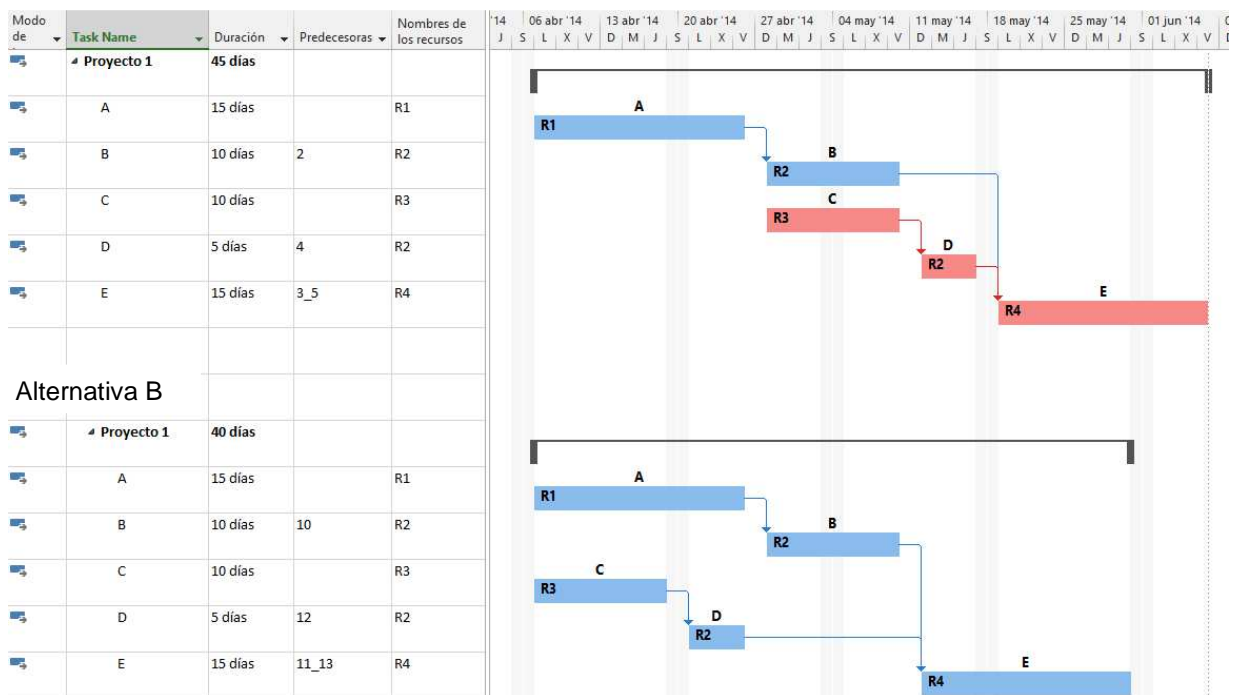


Figura 16: Dos alternativas para resolver el conflicto de recursos

Como se observa en la figura, existen dos soluciones para resolver el conflicto de recursos, en este ejemplo sólo se resolverá la alternativa A (Aunque se llegará al mismo

resultado con ambas opciones, para más información visite el capítulo 6.3 del texto de referencia Critical Chain Second Edition).

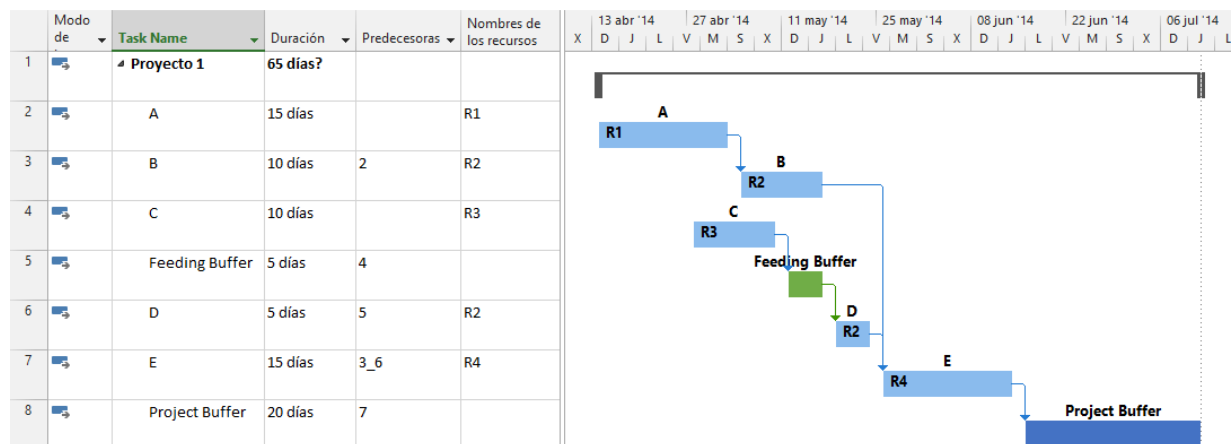


Figura 17: Primera opción con Feeding y Project Buffer

Entonces, al aplicar CCPM la duración del proyecto es 45 días, con un Project Buffer de 20 días, el total es de 65 días.

1.6.8 Ejemplo 3: Malla compleja

La Figura 18 muestra una malla de compleja de 15 actividades con relaciones de precedencia más complejas. En la parte superior de los bloques se encuentra el nombre de la actividad, al medio el recurso utilizado por cada uno representado por letras y abajo la duración en días.

Lo primero es identificar la cadena crítica para este proyecto.

El primer paso es hacer un diagrama de la malla con la duración de las actividades reducida utilizando el criterio P(50). La Figura 19 muestra la Carta Gantt hecha en MS Project. Mirando de izquierda a derecha, se observa cómo el recurso R1 es utilizado por las actividades A-1 y B-2. Luego como el recurso R4 es utilizado por las actividades B-3, C-3 y D-3. Es fácil ver que el camino crítico es la ruta superior en la figura 10, pues no existe espacio entre las actividades.

MS Project permite remover las restricciones de recurso mediante la nivelación de recursos, así el proyecto queda como se ve en la Figura 20. Ahora existen más espacios entre las actividades, haciendo imposible el definir el camino crítico.

Lo siguiente es identificar la cadena crítica. La Figura 21 muestra la cadena crítica definida por el método CCPM y software. Observe como la cadena salta la ruta lógica en varias ocasiones. También se puede ver, al rastrear desde el final del proyecto, que no hay espacios en la cadena crítica hasta este punto, incluso a pesar de que la mayoría de las rutas tienen espacios en ellas.

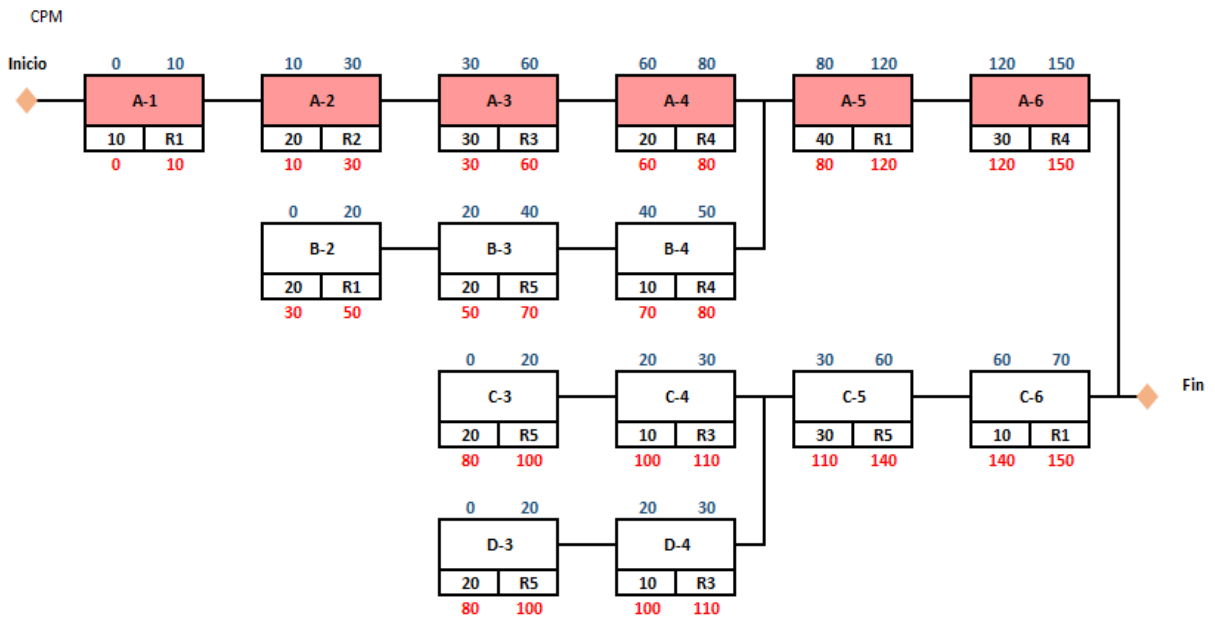


Figura 18: Ejemplo 3 programado por CPM.

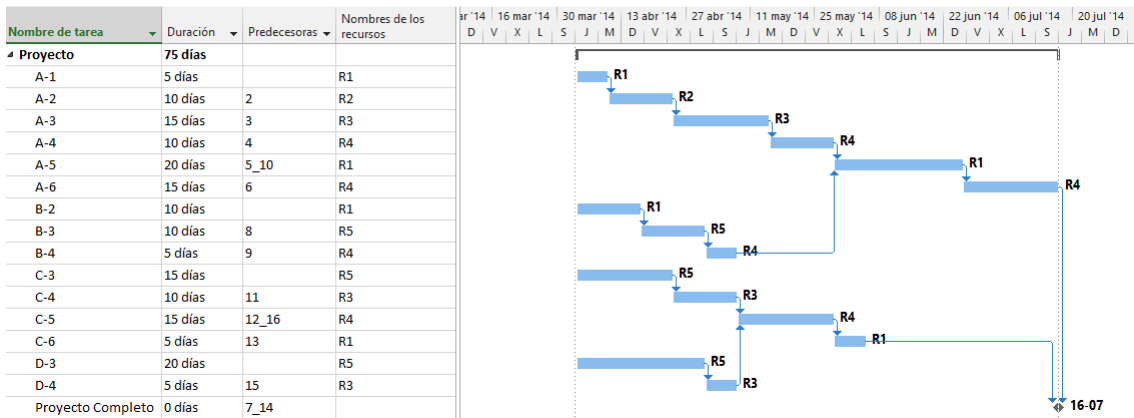


Figura 19: Carta Gantt de ejemplo complejo con la duración de las actividades ya reducidas

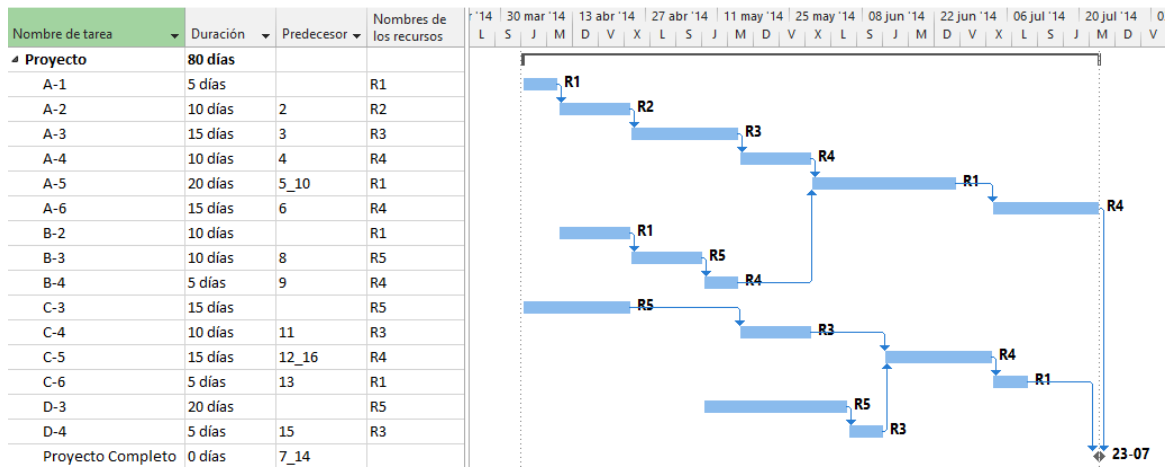


Figura 20: Restricciones de recursos niveladas

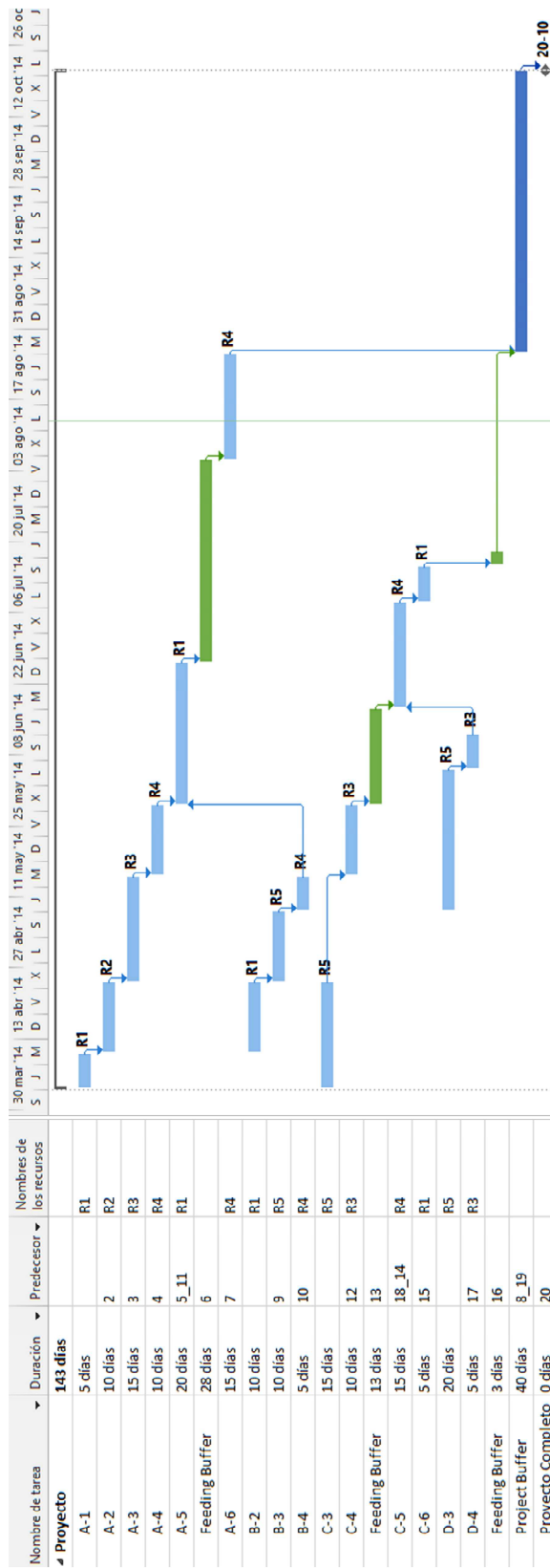


Figura 21: Proyecto con Feeding Buffer y Project Buffer

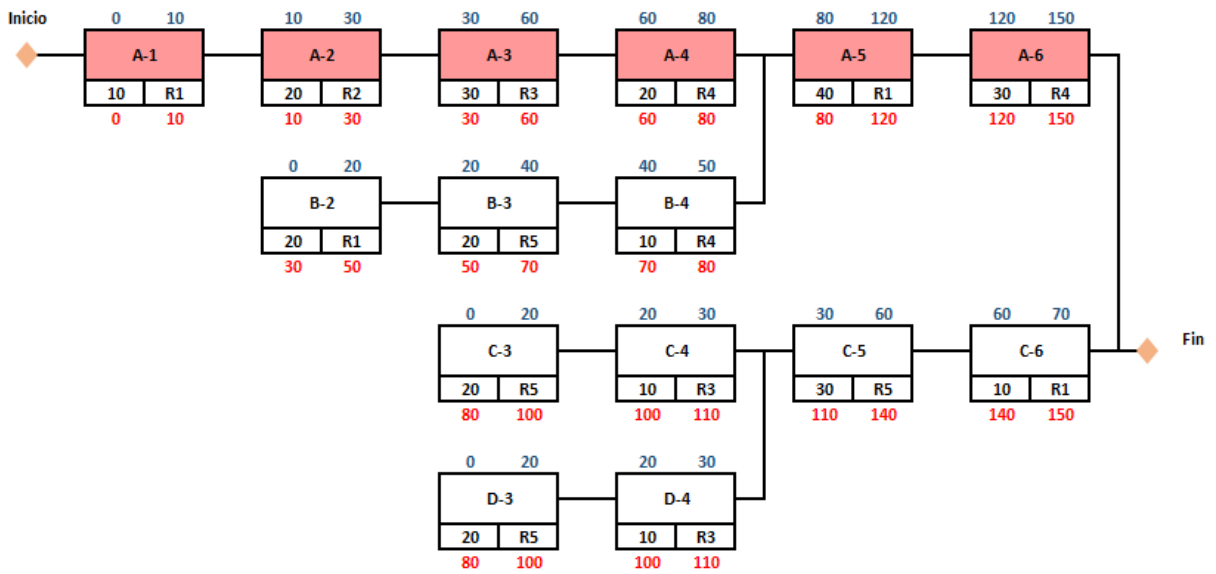


Figura 22: Malla de proyecto complejo programada por CPM

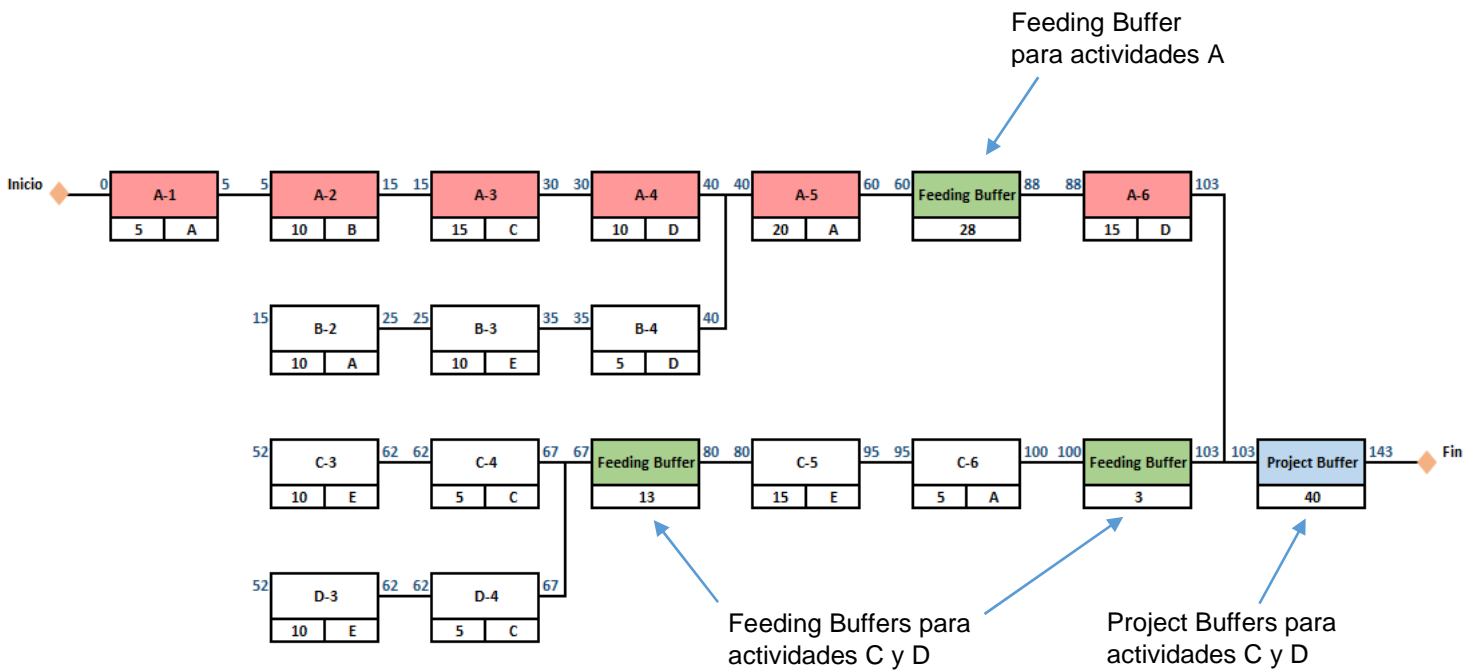


Figura 23: Malla de proyecto complejo programado por CCPM

Nota: El proyecto programado por CPM tiene una duración de 150 días, y con CCPM tiene una duración de 143 (incluye un Project Buffer de 40 días).

1.7 Tabla de Bibliografía

Para el desarrollo de esta memoria se analizó un total de 23 trabajos. A continuación se muestra la bibliografía recopilada y estudiada organizada según año Figura 24 y clasificada según su temática Figura 25.

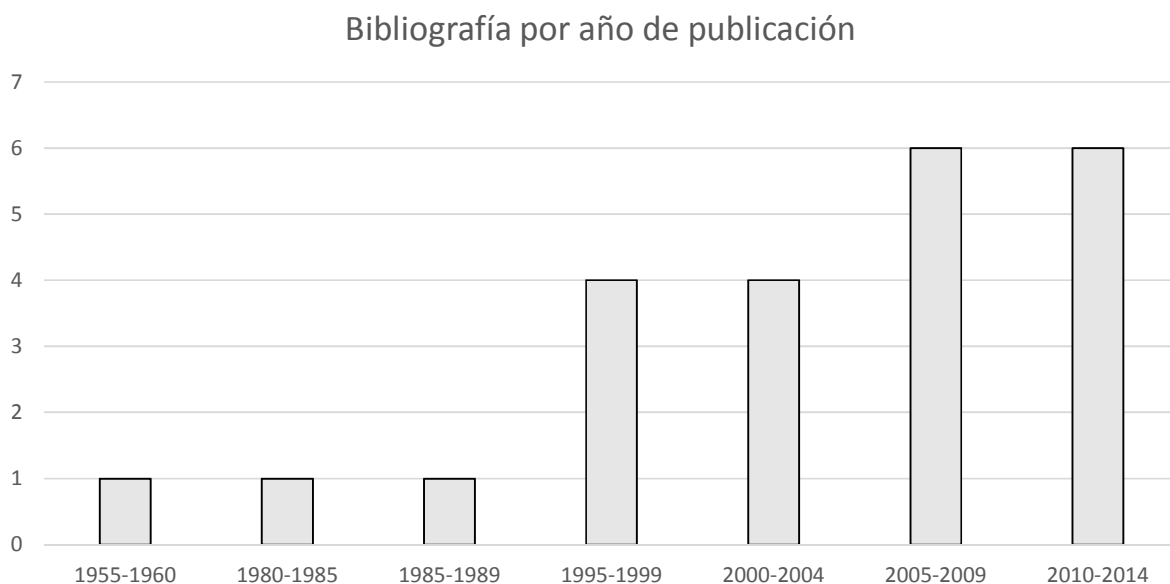


Figura 24: Bibliografía organizada según año

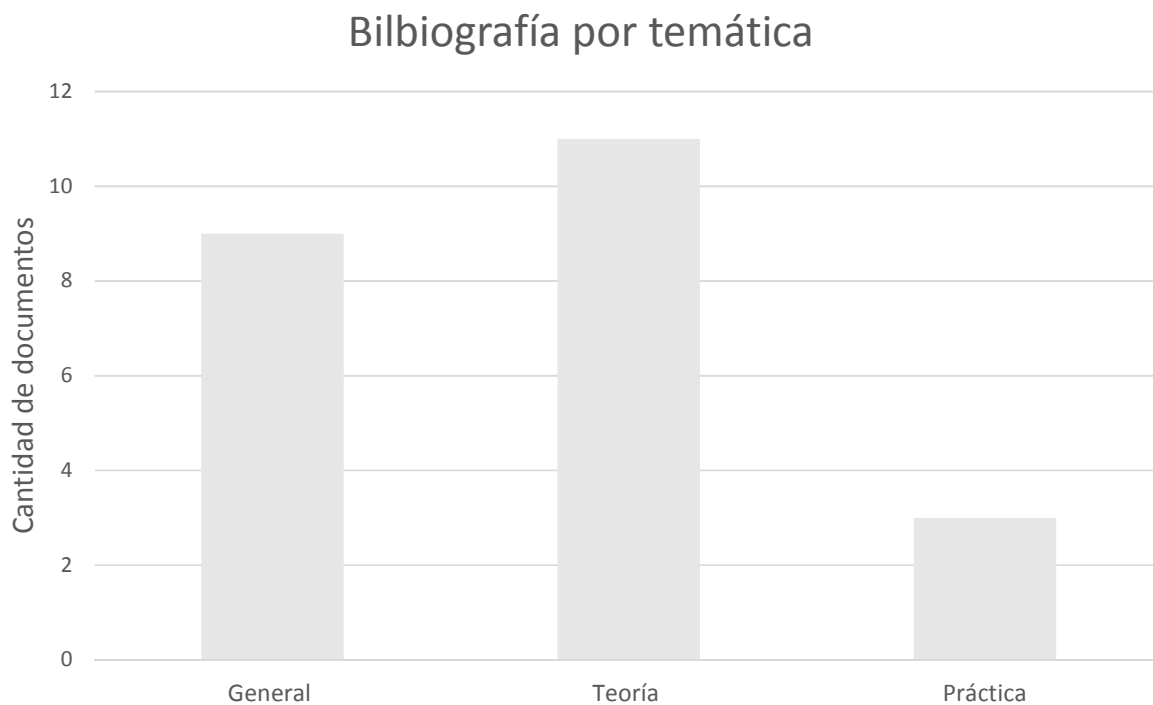


Figura 25: Bibliografía organizada según temática

2 Análisis comparativo de los métodos CCPM y CPM.

2.1 Introducción al capítulo

En el presente capítulo se analizan y comparan las metodologías CPM y CCPM. Para esto se utilizan los siguientes 8 criterios de comparación identificados en la literatura especializada:

Criterio 1: Los objetivos propios de cada método.

Criterio 2: Enfoque de cada método.

Criterio 3: Gestión de los riesgos.

Criterio 4: La gestión de los recursos.

Criterio 5: Enfoque para los problemas de comportamiento humano.

Criterio 6: La programación de las actividades

Criterio 7: Enfoque y metodología para la replanificación.

Criterio 8: Los indicadores para el seguimiento del cumplimiento del cronograma.

Al final del capítulo se muestra una tabla resumen con los criterios aplicados a ambas metodologías.

2.2 Criterio 1: Los objetivos propios de cada método

El método CPM tiene como objetivo principal establecer la(s) secuencia(s) de actividades que definen la duración total mínima del proyecto y considera las relaciones lógicas entre ellas. En CPM la fecha de fin del proyecto es protegida por los márgenes de seguridad en las duraciones de cada actividad y por las holguras en los caminos no críticos que permiten ajustar la programación.

En CPM, la atención se centra en terminar las actividades en la fecha prevista con el objetivo general de cumplir con la fecha fin del proyecto. La atención se focaliza, particularmente, en el cumplimiento de las fechas de las actividades del camino crítico. En el método CCPM, la única fecha que requiere atención es la fecha fin del proyecto. Para cumplir con esta fecha, CCPM centra su atención en el progreso de la cadena crítica, con un especial énfasis en las interacciones entre los recursos.

CCPM crea una secuencia de actividades críticas (Cadena Crítica) teniendo como criterio principal la dependencia de recursos (restricciones) y gestión de Buffers.

CCPM también tiene el objetivo de reducir el trabajo en progreso. Las actividades se programan con el inicio más tardío con las protecciones adecuadas (buffers) con el objetivo de reducir el número de actividades realizadas simultáneamente. CCPM pone en evidencia que es más recomendable tener un nivel de actividad más o menos constante que tener variaciones importantes del número de actividades que se realizan al mismo tiempo.

2.3 Criterio 2: Enfoque de cada método.

El método CPM se enfoca en la secuencia de actividades críticas (camino crítico y las actividades no críticas que definen la ejecución óptima del proyecto, es decir la duración mínima factible. El enfoque es el cumplimiento de las fechas de inicio y término de las actividades críticas y con ello se asegura el cumplimiento con el plazo total.

El método CCPM se basa en la Teoría de las restricciones aplicada al desarrollo de las actividades del proyecto. La Teoría de las restricciones plantea que todo sistema tiene una restricción que limita su productividad. Esto se puede probar ya que si no existiesen restricciones la productividad del sistema podría ser infinita. Es por esto que las restricciones limitan todos los sistemas a un flujo de productividad distinto de infinito. Generalmente se reconocen las restricciones del sistema como un “cuello de botella”, una restricción que limita el flujo a través del sistema.

En CCPM, las actividades no se programan para empezar o terminar en una fecha específica del calendario. El director de proyecto se centra en la cadena crítica y en el seguimiento de su buen desarrollo. La atención del responsable del proyecto se centra en la gestión de los buffers del proyecto y de alimentación, con objeto de evitar un cambio de la cadena crítica y disponer de suficiente buffer para cumplir con la fecha de término.

La metodología CCPM maneja las variaciones de causa común mediante los distintos Buffers insertos en la programación.

2.4 Criterio 3: Gestión de los riesgos

La incertidumbre y el riesgo son inherentes en los proyectos y por tanto deben considerarse en la gestión de los mismos. En relación a los métodos analizados, la manera con la que se gestionan los riesgos es diferente en un método y en otro.

En CPM, se incluyen márgenes de seguridad en las estimaciones de las duraciones individuales de cada actividad. La respuesta para los posibles eventos de riesgo, es determinar la criticidad de las actividades, para luego insertar mayor margen de seguridad en las actividades críticas.

El riesgo en CPM también se gestiona mediante las holguras disponibles en las actividades que no son críticas.

En CCPM se trata explícitamente el riesgo. Algunos autores argumentan que en las estimaciones de duraciones siempre se tiene en cuenta el riesgo, introduciéndose un margen de seguridad que aumente la probabilidad de terminar la tarea en el plazo previsto. Goldratt propone que los márgenes de seguridad de las actividades de la cadena crítica se agrupen en el buffer del proyecto (Goldratt, 1997). Para que las variaciones en las cadenas secundarias no afecten a la cadena crítica, en CCPM se insertan Feeding Buffer que agrupan los márgenes de seguridad de las actividades de la cadena considerada. Este buffer de alimentación se considera suficiente para soportar las variaciones, así las tareas se programan con un inicio más tardío. El efecto que tiene esta situación es que minimiza el trabajo simultáneamente en proceso y, por consiguiente, reduce la probabilidad de los eventos de riesgos, puesto que hay menos trabajos que se están realizando al mismo tiempo.

En CCPM el riesgo está directamente gestionada en los buffers. La decisión de reprogramar trabajo solo se requiere si un buffer o más son totalmente consumidos.

2.5 Criterio 4: La gestión de los recursos.

En el método CPM no se considera explícitamente las relaciones de dependencias entre los recursos. Los problemas de sobreasignación deben ser resueltos, pero las relaciones de dependencia son independientes del camino crítico. En CCPM, se insertan buffers de recursos para asegurar la disponibilidad de un recurso cuando se requiere su actuación en una actividad de la cadena crítica. Se trata de una señal para advertir al recurso de su inminente intervención en la cadena crítica y se visualiza en la programación mientras que en CPM no aparece explícitamente en el cronograma.

Otro punto a destacar es que el método del Camino Crítico tiende a maximizar el uso de todos los recursos, mientras que el de la Cadena Crítica se centra en los recursos críticos que producen los cuellos de botella (aquellos que intervienen sólo en las actividades de la cadena crítica).

Mediante el uso de CPM se intenta obtener la máxima utilización de todos los recursos de la organización mientras que la idea en CCPM es que la productividad del sistema solo puede ser máximo si el recurso limitado se utiliza al máximo.

En CPM, los recursos son coordinados siguiendo el camino crítico. Cuando las actividades críticas sufren retraso, se asignan más recursos a estas actividades o a las siguientes del camino crítico, para evitar retrasos en la fecha fin del proyecto. En CCPM, los recursos son coordinados utilizando el estado de los buffers del proyecto. Durante la ejecución, los buffers de recurso se visualizan en la programación y advierten un retraso en la actividad de un recurso cuya siguiente tarea es crítica. Esta señal asegura la disponibilidad del recurso cuando es necesario.

En CCPM, la cadena crítica se define a partir de las dependencias entre las actividades y también las de los recursos. Una diferencia sustancial entre los métodos es que mientras CCPM evita la multitarea, en CPM se fomenta la utilización máxima de las capacidades de los recursos, dándose lugar a la multitarea.

Los problemas de asignación de los recursos (Resource-constrained Scheduling Problem) se suelen resolver mediante software, pero en muchas ocasiones, el resultado de la nivelación de recursos propuesto por los softwares no resulta ser el óptimo teniéndose que resolver manualmente. Algunos autores aconsejan retrasar las actividades que no pertenecen a la cadena crítica hasta que se resuelvan los problemas de sobreasignación (Goldratt, 1997), (Leach, 1999).

2.6 Criterio 5: Enfoque para los problemas de comportamiento humano.

Actualmente hay un interés emergente en investigar los resultados poco exitosos o de bajo rendimiento en los proyectos desde el punto de vista del comportamiento humano en la ejecución de Proyectos (Aronson et al, 2004).

CPM, no aborda explícitamente los problemas de comportamiento humano (motivación, conflictos, curva de aprendizaje) y sólo puede aplicar un mayor margen de seguridad en las duraciones de las actividades.

Por otra parte, el método de la Cadena Critica intenta evitar algunas de las fuentes de los conflictos humanos que surgen en la ejecución de Proyectos. Así, en el modelo propuesto por Goldratt se mencionan el síndrome del estudiante y la ley de parkinson, en relación a comportamientos humanos (Goldratt, 1997). En su propuesta, este autor recomienda hacer las estimaciones de las duraciones de las actividades, considerando que existe una probabilidad del 50% de terminar la actividad a tiempo. Adicionalmente, aconseja no programar las fechas de inicio y de fin de las actividades con el fin de disminuir la presión en los trabajadores en relación al cumplimiento de fechas. Al evitar controlar las actividades con fechas, utilizando duraciones, y reduciendo las holguras mediante un inicio más tarde en las actividades que no pertenecen a la cadena crítica, se minimizan los aspectos no deseados en el comportamiento humano.

2.6.1 Ley de Parkinson

El trabajo aumenta hasta usar el tiempo total del que se dispone para su realización (C. Northcote Parkinson 1957). Esto hace que en la práctica las actividades no críticas, se realicen usando toda su holgura.

2.6.2 Síndrome del Estudiante

Según Goldratt la experiencia muestra un patrón típico de trabajo en las personas. Se hace menos de un tercio del trabajo durante los primeros dos tercios de la duración de la actividad y los dos tercios restantes del trabajo se hacen en el último tercio de la duración de la actividad. Las personas que ejecutan la actividad tienden a encontrar problemas para completar la actividad durante el último tercio de la duración planificada, lo que hace imposible mantener la duración original. En la práctica esto hace pensar que la actividad fue subestimada desde un principio. (Goldratt 1997).

2.6.3 Curva de aprendizaje

La teoría de las restricciones reconoce este fenómeno expuesto por Fred Brooks (The Mythical, Man-Month, 3rd ed., 1995, Addison-Wesley). El observó un gran consumo de tiempo en la realización de actividades que viene principalmente del aprendizaje requerido por el equipo de trabajo para poder realizar el proyecto. Esta curva de aprendizaje es mostrada en la Figura 26: Curva de aprendizaje. El diagrama muestra el porcentaje de trabajo completado versus la duración del proyecto, la experiencia indica que se encuentra una relación no lineal. Inicios tardíos son seguidos por una aceleración

del trabajo realizado hasta el punto de finalización del proyecto. La línea punteada muestra un modelo perfecto en donde se asume que se cumple una cierta cantidad de trabajo en una cierta cantidad de tiempo de manera constante, por ejemplo, cuando ha pasado un 25% del tiempo desde que se inició el proyecto, se debería tener un 25% del proyecto completo.

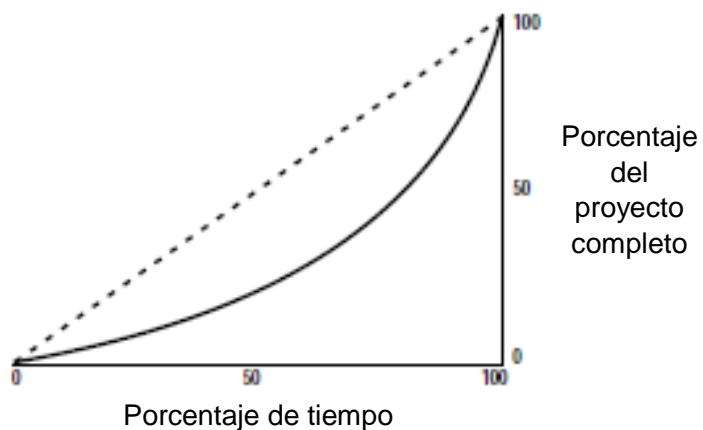


Figura 26: Curva de aprendizaje

2.7 Criterio 6: La programación de las actividades

La programación de actividades CPM se realiza estableciendo las secuencias de actividades, considerando las relaciones lógicas de precedencia, y con ello se calculan las secuencias de actividades sin holguras, que definen la duración mínima (secuencia más larga). Es importante destacar que no considera explícitamente la dependencia de recursos.

CCPM utiliza como base la malla de red usada por CPM realizando algunas modificaciones como se ha indicado en el capítulo 1, mantiene las relaciones lógicas pero añade más relaciones al considerar explícitamente la dependencia de recursos. Trabaja con duraciones que tienen el 50% de probabilidad de cumplimiento de las actividades y un sistema de Buffers para asegurar su cumplimiento.

El método CCPM, propone dimensionar el buffer del proyecto como el 50% de la duración total de la cadena. La línea base obtenida por CCPM se sitúa entre un 10% y un 30% más corta que la de CPM.

En CCPM en general no se usan hitos de control internos.

2.8 Criterio 7: Enfoque y metodología para la replanificación

CPM centra su atención en controlar que las actividades y los hitos del camino crítico no tengan retraso. En ocasiones, si ocurre un retraso, los objetivos del proyecto se ven comprometidos para esto CPM tiene herramientas como Crashing (intensificación), Fast track o finalmente se opta por modificar los plazos.

En la ejecución de proyectos siempre se producen variaciones entre lo programado y lo ejecutado. En ambos métodos se utilizan informes periódicos de avance del proyecto. En CPM, se controlan prioritariamente las actividades del camino crítico y en CCPM las actividades de la cadena crítica. En los dos métodos, finalmente, el proyecto es implícitamente o explícitamente replanificado. Por explícitamente, se entiende que un programa "óptimo" se recalcula mientras el proyecto avanza (Herreolen and Leus, 2001, 2002). En teoría, replanificar periódicamente sería lo óptimo, pero los costos de comunicación, de coordinación y la renegociación con los proveedores y contratistas en algunos casos pueden ser prohibitivos.

En CCPM se requiere replanificar el cronograma solo si un Buffer o más son totalmente consumidos.

En CCPM, se intenta conservar el programa previsto y mantener las fechas de inicio programadas con inicio más tardío de las primeras actividades de las cadenas distintas de la cadena crítica. Contrariamente, en CPM, el inicio de las tareas está condicionado por las fechas previstas en la línea base y los retrasos se transmiten a la actividad siguiente.

2.9 Criterio 8: Los indicadores para el seguimiento del cumplimiento del cronograma

En la metodología CPM, se reportan y controlan las fechas de inicio y de fin de las actividades críticas acabadas o en proceso frente a las definidas en el cronograma oficial (línea base). También se controla el cumplimiento de los hitos y el avance físico (porcentaje de actividades hechas), que proporciona indicadores para seguir el progreso del proyecto y su pronóstico.

Cuando se aplica CCPM no se programan los inicios y fines de las actividades en fechas fijas, por lo que faltan los puntos de referencia para el análisis del porcentaje de actividades hechas. En cambio, se controla el consumo del buffer y se compara el buffer disponible con el mínimo requerido para cumplir con la fecha de término comprometida. El control de los buffers proporciona una vista del trabajo realizado pero también señala las partes que necesitan atención porque cada buffer se relaciona a una cadena de actividades específicas.

2.10 Tabla comparativa de ambas metodologías

A continuación la Tabla 4 resume las principales características entre las metodologías CPM y CCPM considerando los criterios 8 utilizados.

Criterio	CPM	CCPM
2.2 Objetivos propios de cada método	-Determinar la duración del proyecto y el camino crítico a través de la secuencia de actividades que da el plazo mínimo considerando las relaciones de precedencia.	-Determinar la duración del proyecto y la cadena crítica, con secuencia de actividades que considera relaciones de precedencia y dependencia explícita de recursos.
2.3 Enfoque de cada método	-Construye y resuelve la malla de red -Calcula fechas más tempranas y más tardías -Determina la secuencia de actividades sin holguras (camino crítico)	-Construye y resuelve la malla de red Considera: -TOC (Teoría de las restricciones) -Síndrome del estudiante -Ley de Parkinson -Consideración de curva de aprendizaje -Determina la cadena crítica -Manejo de variaciones de causa común a través de los distintos tipos de buffers.
2.4 Gestión de los riesgos	-Sobre estimación de duraciones añadiendo márgenes de seguridad en cada actividad	-Se trabaja con duraciones con un 50 % de probabilidad de que la actividad sea completada -Los márgenes de seguridad se manejan a través de Buffers especiales para distintos casos gestionados por Jefe de proyecto
2.5 La gestión de los recursos	-Utiliza técnica de nivelación de recursos para maximizar su uso -Promueve la multitarea para optimizar uso de recursos	-Define exclusividad de los recursos (100% dedicados) -Evita cuellos de botella que definen la productividad del sistema -Enfatiza la productividad realista

2.6 Enfoque para los problemas de comportamiento humano	<ul style="list-style-type: none"> -Supone prioridad en actividades críticas -Supone que las personas no utilizan las holguras 	Aborda y mitiga los efectos de: <ul style="list-style-type: none"> -Síndrome del estudiante -Ley de Parkinson -Consideración de curva de aprendizaje
2.7 La programación de las actividades	<ul style="list-style-type: none"> -Utiliza relaciones lógicas de precedencia -Margen de seguridad dentro de las duraciones de cada una de las actividades -No considera dependencia de recursos de forma explícita -Utiliza holguras en cada actividad 	<ul style="list-style-type: none"> -Utiliza relaciones lógicas de precedencia -Considera duración de actividades con 50% de probabilidad de completarse -Margen de seguridad en Buffers -Considera dependencia de recursos de forma explícita -No usa holguras en duración de actividades -Programación fechas más tardías
2.8 Enfoque y metodología para la replanificación	<ul style="list-style-type: none"> En caso de consumir holguras -Cambiar duraciones de actividades (Crashing, intensificación de recursos) -Cambiar relaciones lógicas (Fast Track) -Replanificar 	<ul style="list-style-type: none"> -Se evita la replanificación, es un caso extremo -Se replanifica sólo si uno o más Buffers son consumidos
2.9 Los indicadores para el seguimiento del cumplimiento del cronograma	<ul style="list-style-type: none"> -Porcentaje de cumplimiento de actividades críticas -Avance físico (porcentaje de actividades hechas) -Consumo de holguras -Avance real v/s plan -Cumplimiento de Hitos -Pronóstico de término 	<ul style="list-style-type: none"> -Plan de uso de Buffers -Control de uso de Buffers -No usa Hitos

Tabla 4: Tabla comparativa de ambas metodologías

3 Análisis de proyectos tipos con CPM y CCPM

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan y analizan a partir de las metodologías CPM y CCPM diferentes cronogramas de proyectos tipos. Estos han sido obtenidos a partir de otras redes de cronogramas reales y **juicio de expertos**. Los proyectos comprenden su ejecución desde la etapa inversional. Los proyectos a analizar son:

- Edificio de Departamentos basado en proyecto ubicado en Santiago Centro.
- Conjunto Habitacional basado en proyecto ubicado en Calama.
- Ejecución de Pique de Acceso y Túnel interestación basado en un proyecto del Metro de Santiago.
- Camino basado en proyecto ubicado en la Región de los Ríos.

El objetivo de los proyectos tipos es exponer de forma simplificada la metodología con la cual se programan los proyectos mencionados anteriormente, se considera representativo usar alrededor de 30 actividades.

Los cronogramas de Cadena Crítica se desarrollan a partir de los cronogramas programados según camino crítico con la metodología expuesta en el punto 1.6.3.

3.2 Proyecto de Edificio de Departamentos

3.2.1 Descripción

El proyecto que se representa a continuación es una simplificación de un proyecto de edificio de departamentos ubicado en Santiago Centro, el edificio original cuenta con 23 pisos y 4 subterráneos. La obra gruesa tiene una duración de 315 días hábiles.

En este caso para evitar repetición del mismo grupo de actividades y observar el patrón de construcción se consideró representativo sólo 4 pisos y un subterráneo.

3.2.2 Actividades Principales

Entre las actividades principales se encuentran las siguientes:

Diseño
Ingeniería básica
Aprobación ambiental
Ingeniería de detalles

Project Management
Compras de equipos de procesos
Compras de materiales de construcción
Licitación de contratos de construcción y servicios especializados
Obtención de Permisos de construcción

Construcción
Movimiento de tierras
Fundaciones
Obra Gruesa
Terminaciones Gruesas
Terminaciones Finas

Tabla 5 : Actividades principales para proyecto de Edificio de Departamentos.

Dentro de las actividades de Fundaciones se encuentran emplantillado de Heridos, instalación de enfierradura de fundaciones con elevaciones, instalación de moldajes y colocación de hormigón.

Dentro de las actividades de Obra Gruesa se encuentran las siguientes actividades para Subterráneos y estructura en altura: enfierradura Moldajes muros interiores, Hormigón muros interiores, Moldajes muros perimetrales, Hormigón muros perimetrales.

3.2.3 Supuestos

- La reducción de la duración de las actividades utilizando el criterio P(50), corresponde al 50% de la duración de la actividad, es decir si una actividad dura 10 días se asume que en promedio se completa en 5 días, esto no aplica para las actividades de obra gruesa.
- La reducción de las duraciones de las actividades de Obra Gruesa utilizando el criterio P(50), corresponde a un 75% de la duración original, esto en base a la experiencia de ingenieros con más de 20 años en el rubro.
- En la etapa de Project Management se tiene que la actividad “Obtención de Permiso de Construcción” tiene una duración de 60 días.
- Las actividades previas a la construcción de la obra tienen cada uno sus propios recursos y no se intervienen entre ellos, es decir no existe dependencia de recursos en las actividades previas a la construcción de la obra.
- Las actividades correspondientes a las Terminaciones Gruesas tienen una relación “CC” (Comienzo-Comienzo) con las actividades de Obra Gruesa que corresponden a la instalación de cañerías para las redes de luz, agua y gas. Estas tienen que instalarse en paralelo a la obra gruesa, en este caso se asumirá que la relación es de “CC”.
- Las actividades correspondientes a fundaciones y obra gruesa utilizan el recurso Frente de Trabajo 1 (“FT1” en el cronograma), el cual está especializado para estas actividades, por lo tanto es necesario programar las actividades de tal forma que no se intervengan.
- Las actividades correspondientes a Terminaciones Gruesas utilizan el Frente de Trabajo 2 (“FT2” en el cronograma), el cual está especializado para estas actividades, por lo tanto todas las actividades correspondientes a este conjunto tienen que ser programadas de tal forma que no compartan recursos simultáneamente.
- Las actividades correspondientes a Terminaciones Finas utilizan el Frente de Trabajo 3 (“FT3” en el cronograma), el cual está especializado para estas actividades, por lo tanto todas las actividades correspondientes a este conjunto tienen que ser programadas de tal forma que no compartan recursos simultáneamente.
- Las actividades correspondientes a Terminaciones finas corresponde a la instalación de tabiques, ventanas, puertas además de pisos, pinturas, accesorios para espacios comunes.

- Es necesario tener un desfase de dos pisos en donde la obra gruesa esté completa para poder iniciar las actividades de terminaciones finas.

3.2.4 Cronograma CPM

A continuación se muestra el cronograma real de la obra, primero se muestra la etapa de Diseño y Project Management.

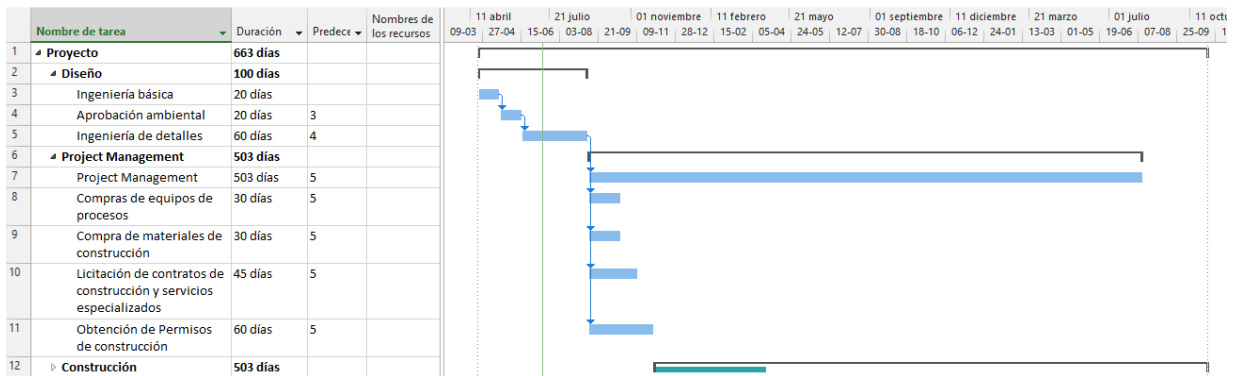


Figura 27: Etapa de Diseño y Project Management

Etapa de construcción:

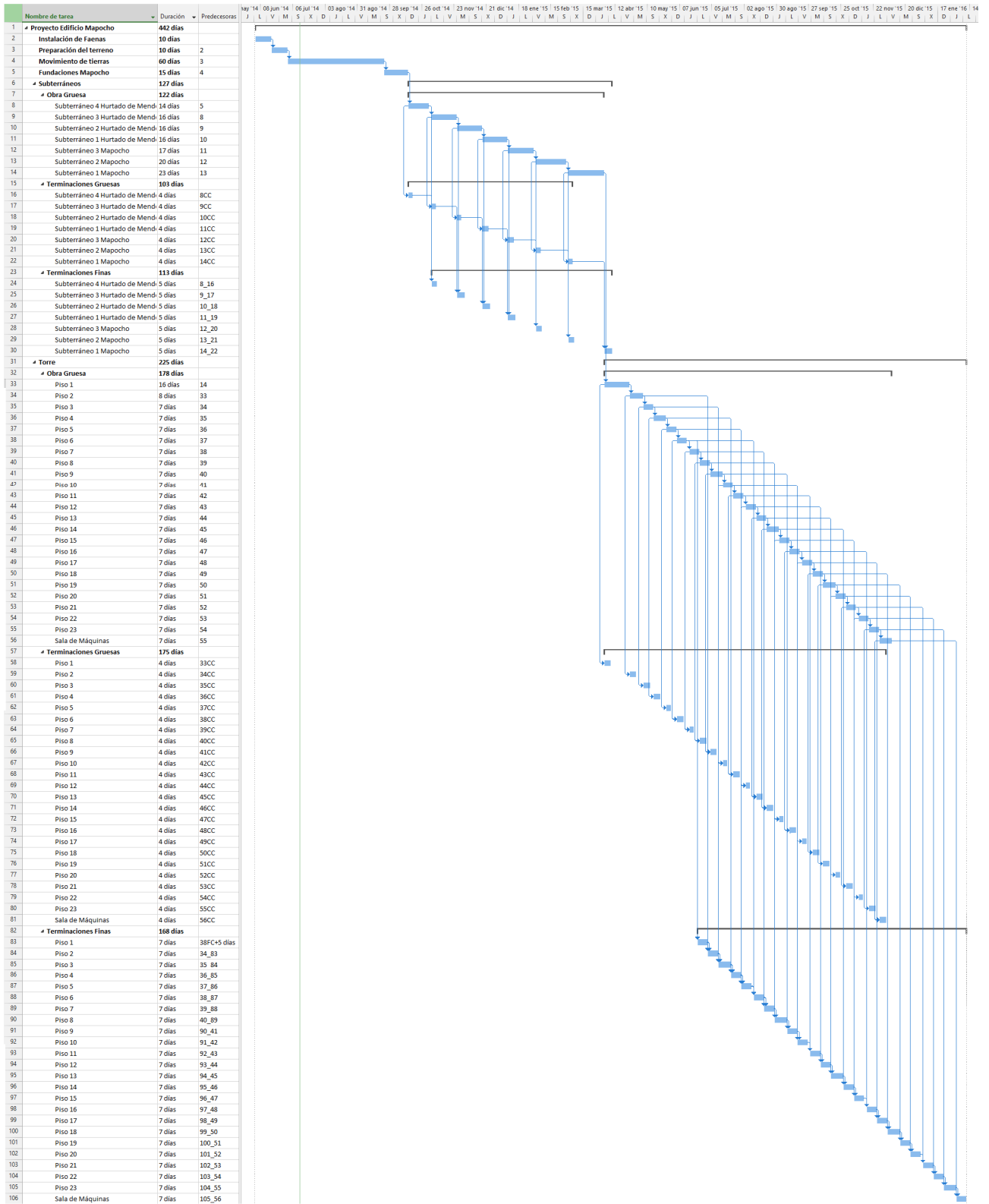


Figura 28: Etapa de construcción de proyecto real.

Para efectos de estudio de la metodología se simplificará la obra gruesa del proyecto a un subterráneo y cuatro pisos, con esto se obtiene el siguiente cronograma:

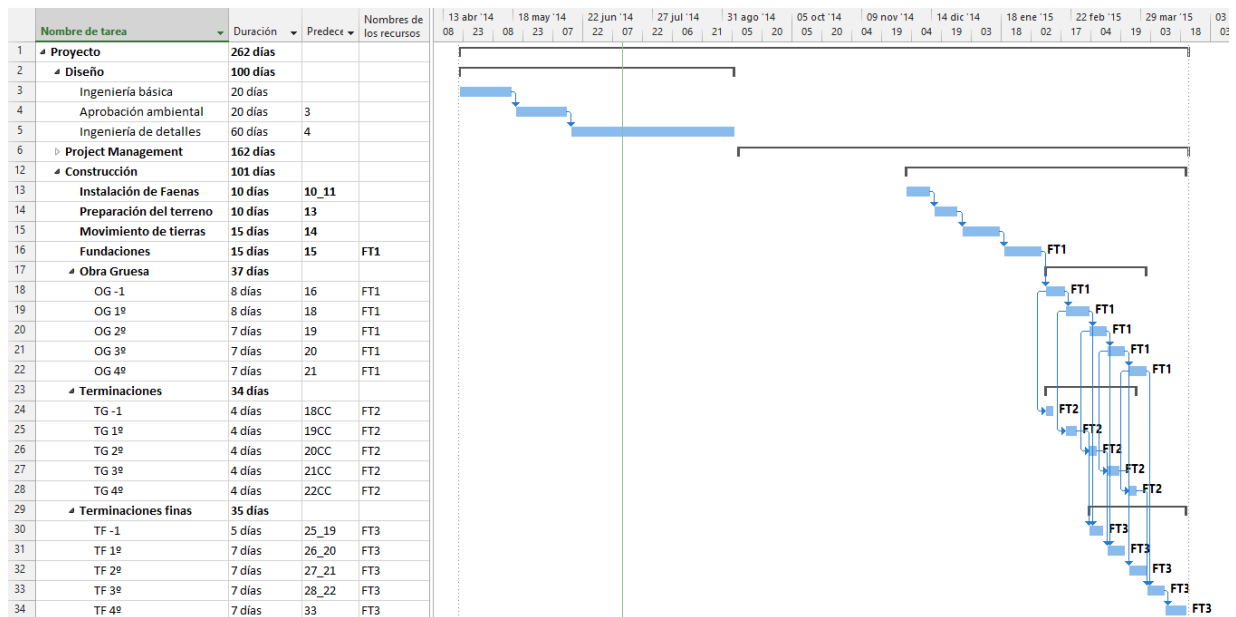


Figura 29: Etapa de Construcción Proyecto de Edificio simplificado

3.2.5 Desarrollo por CCPM

Según la metodología expuesta en el punto 1.6.4, primero se identifica la Cadena Crítica. Para esto se reducen las duraciones de las actividades utilizando el criterio P(50) según los primeros dos supuestos expuestos anteriormente. Luego se programan las actividades con fechas tardías, en este caso las únicas actividades afectadas son las de las terminaciones finas.

Las actividades de las Terminaciones gruesas no se mueven, debido a que tienen restricción de ser iniciadas al mismo tiempo que la de las Obra Gruesa para este ejemplo.

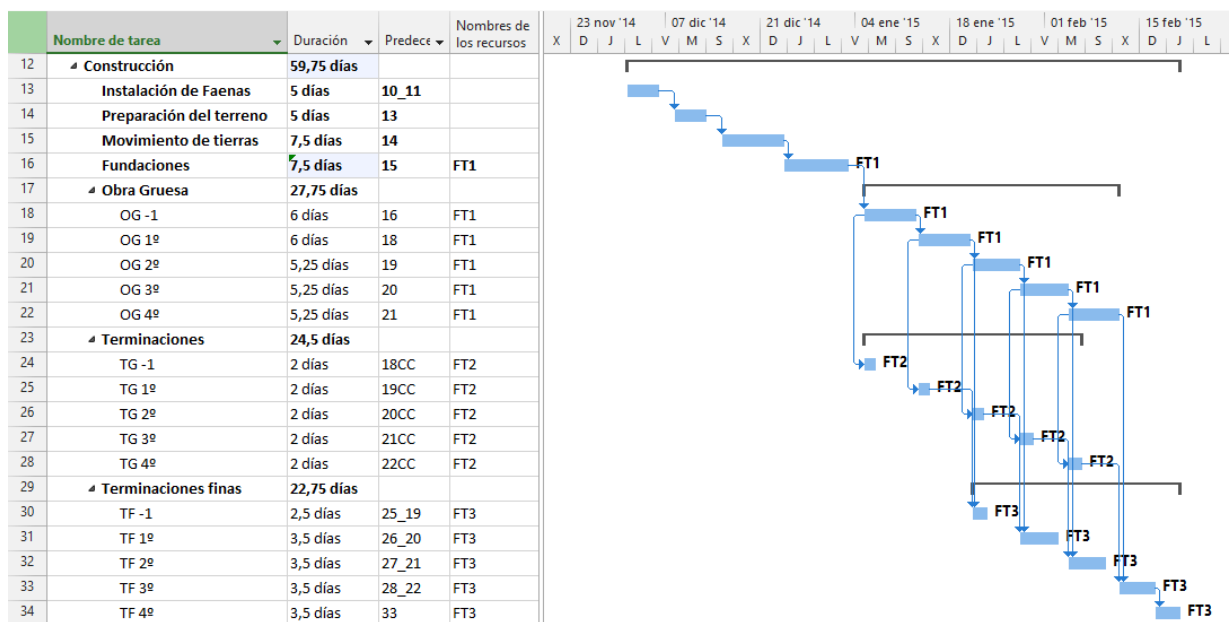


Figura 30: Etapa de construcción con plazos reducidos utilizando criterio P(50).

Análisis de la Cadena Crítica

Se añade el buffer de proyecto al final de la Cadena Crítica. En este caso el Buffer de Proyecto corresponde a la mitad de las reducciones de plazo en todas las actividades, en este caso las actividades de obra gruesa para CPM tienen una duración de 101 días, en CCPM con reducción de actividades se obtiene 60 días, la diferencia es 41 días, luego el Project Buffer es de 21 días.

Finalmente se añaden los Resource Buffer los cuales deben tener una duración de la mitad de la actividad que consume el recurso, estos se insertan entre las actividades que utilizan los mismos recursos, por ejemplo "OG -1" y "OG 1°"

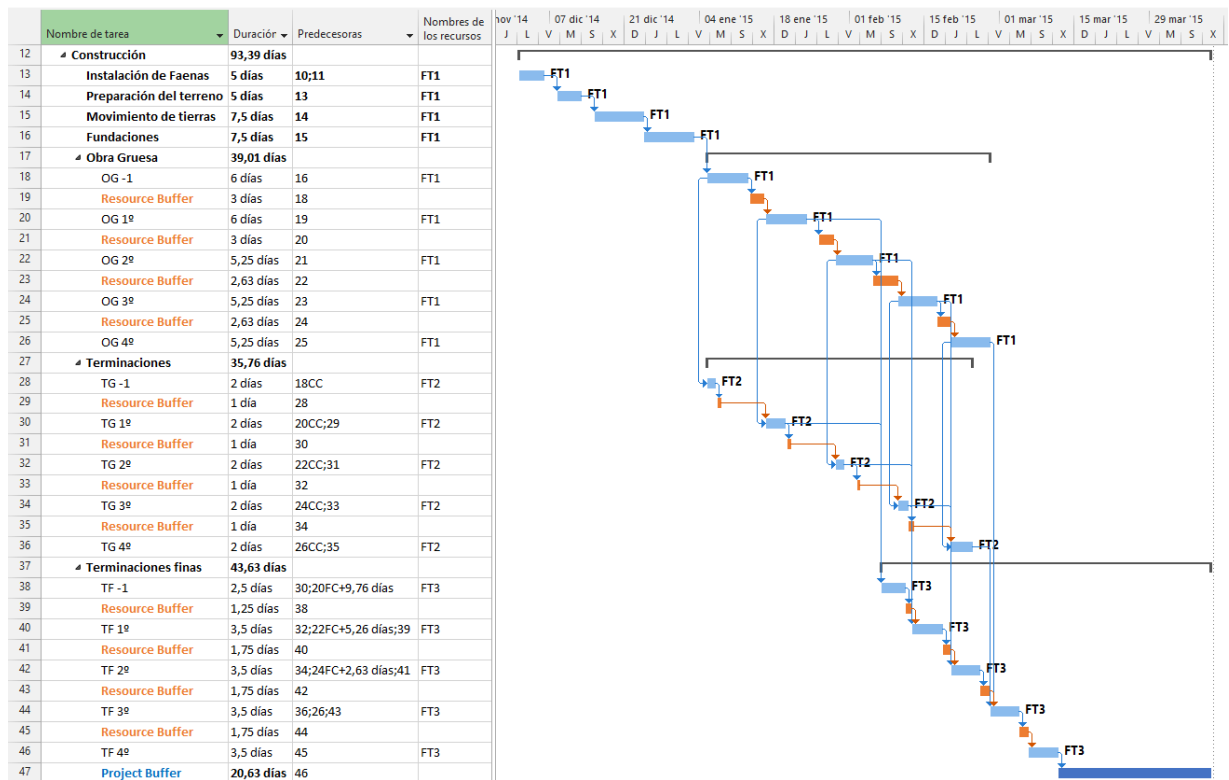


Figura 31: Cronograma CCPM con los Buffers insertados

3.2.6 Análisis

Por el método CPM el proyecto simplificado tiene una duración de 101 días, luego al programar por el método CCPM se tiene una duración de 73 días más un Project Buffer de 21 días.

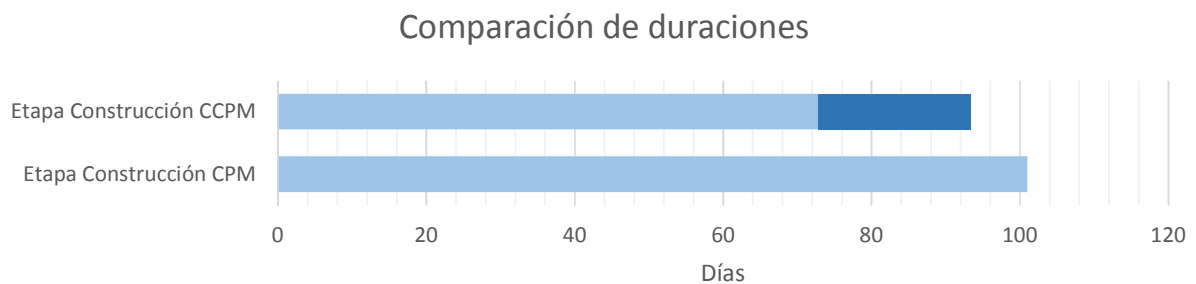


Figura 32: Comparación de duraciones para proyecto de edificio de departamentos

En la Figura 32 las barras azules representan la duración en días del proyecto programado por las dos metodologías, la barra naranja representa el Project Buffer para la metodología CCPM.

La Etapa de Construcción por la metodología CCPM corresponde a un 72% de la duración original de la Etapa de Construcción, esto sumado a un Project Buffer de 21% de la duración original. Suponiendo que se consumen todos los buffers para el proyecto programado por la metodología CCPM se tiene una reducción del 7,5% respecto a la programación por la metodología CPM.

Extrapolando al proyecto original, la etapa de construcción en donde la duración original es de 442 días, la reducción del plazo se hace a 318 días de proyecto más 90 días de Project Buffer. Con lo que se tiene una reducción de 33 días suponiendo que se consumen todos los buffers para la metodología CCPM respecto a la metodología CPM.

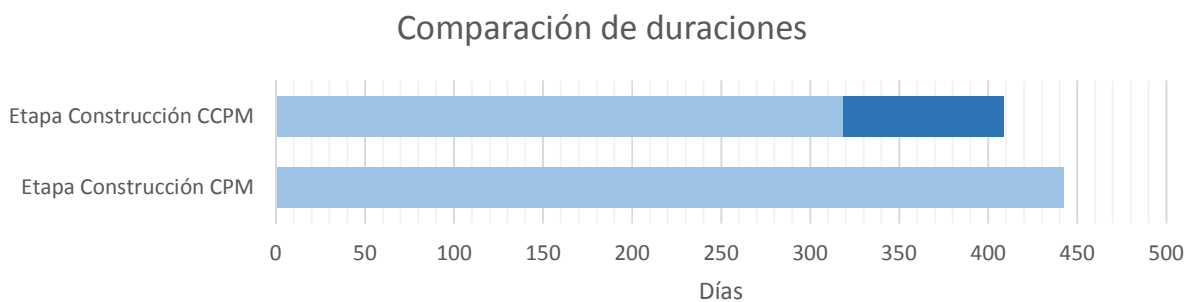


Figura 33: Comparación de para Proyecto de Edificio de departamentos Completo

En el proyecto de edificio utilizando la metodología CCPM, se logra obtener una disminución del tiempo planificado para concluir el proyecto, siendo este un 7,5 % menor al plazo planificado con la metodología CPM. Esto se logra utilizando duraciones de actividades estimadas con el criterio P(50) (explicado en el punto 1.6.3) y redistribuyendo las holguras de cada actividad en Buffers insertos estratégicamente en el cronograma.

En este caso las actividades de la cadena crítica difieren de las del camino crítico por las secuencias lógicas definidas, pues las terminaciones finas fueron reprogramadas lo más tardíamente posible. En cambio debido a las relaciones lógicas de CC entre las actividades de obra gruesa y terminaciones gruesas hace que la reprogramación más tardía no sea posible para estas. Esto se puede observar en la Figura 34 con el cronograma CPM y la Figura 35 con el cronograma CCPM.

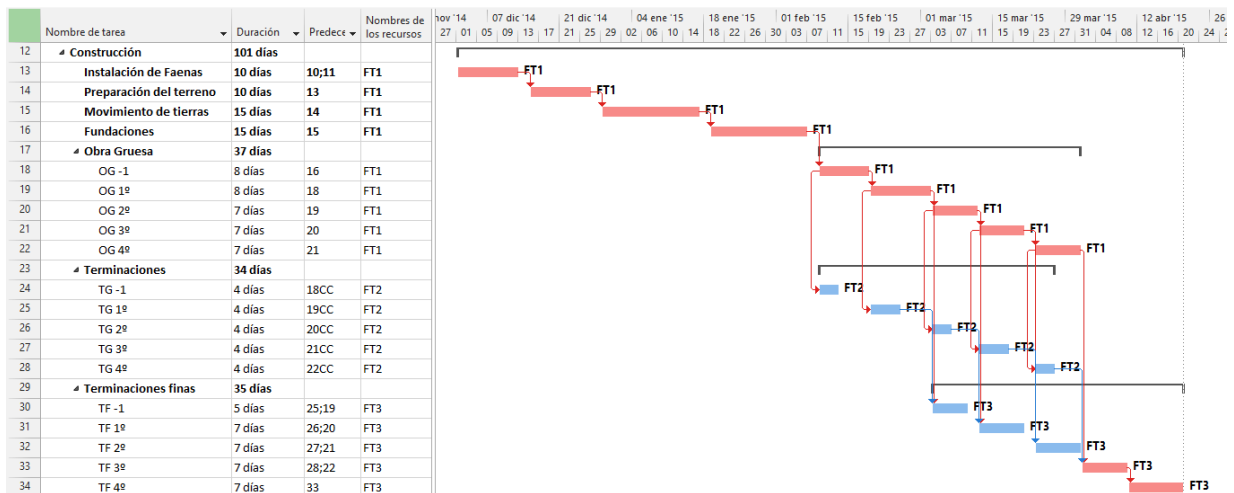


Figura 34: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.

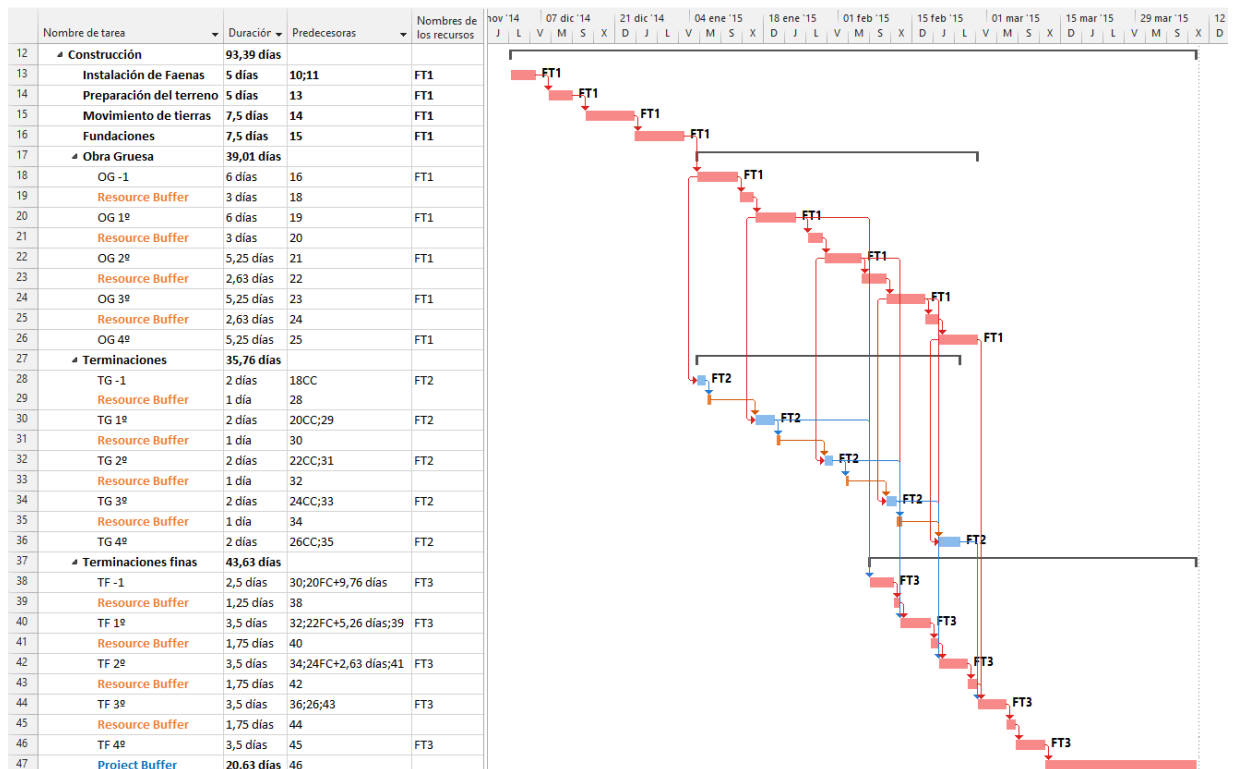


Figura 35: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.

Si bien el cronograma CCPM parece más comprimido que el cronograma CPM, hay que considerar la flexibilidad del cronograma CCPM y su capacidad de manejar las holguras de forma centralizada.

Los Resource Buffer de las actividades “terminaciones finas” no afectan significativamente la estructura del cronograma CCPM, esto debido a las relaciones lógicas anteriormente mencionadas. Pero aun así los Resource Buffer sirven para alertar al jefe de proyecto en caso de consumo de estos la posible existencia de retraso en las actividades.

La reducción del plazo original planificado del proyecto del 7,5 % también significa una reducción en el costo del proyecto (no cuantificado en esta memoria), pues disminuyen los gastos generales.

3.3 Proyecto de Conjunto Habitacional

3.3.1 Descripción:

El Proyecto de Conjunto Habitacional se basa en el proyecto ubicado en la ciudad de Calama, los tiempos de construcción de los distintos elementos fueron tomados del cronograma de actividades del proyecto principal. El proyecto se subdivide en 4 etapas, la primera de 64 casas, la segunda de 71 casas, la tercera de 24 casas y la cuarta con 89 casas.



Figura 36: Conjunto Habitacional

Para la construcción de las casas se utilizaron varios frentes de trabajo, en el ejemplo simple sólo se utilizó un frente de trabajo.

3.3.2 Actividades Principales

Diseño
Ingeniería básica
Aprobación ambiental
Ingeniería de detalles

Project Management
Compras de equipos de procesos
Compras de materiales de construcción
Licitación de contratos de construcción y servicios especializados
Obtención de Permisos de construcción

Construcción
Instalación de Faenas
Preparación del terreno
Movimiento de tierras
Fundaciones
Obra Gruesa
Terminaciones Gruesas
Terminaciones Finas

Tabla 6 : Actividades principales para Proyecto de Conjunto habitacional.

Las actividades de fundaciones incluyen las siguientes actividades:

Emplantillado.

Instalación de enfierradura de fundaciones con elevaciones.

Hormigón de fundaciones.

Instalación de moldajes.

Acero losa de fundación.

Colocación de hormigón losa de fundación.

Las actividades de Obra Gruesa incluyen las siguientes actividades:

Acero para muros y pilares de primer piso.

Moldaje para muros y pilares de primer piso.

Moldaje para losas y vigas de primer piso.

Acero para losas y vigas primer piso.

Hormigón para losas y vigas primer piso.

Acero para muros, pilares y vigas de segundo piso.

Moldajes para muros, pilares y vigas para segundo piso.

Hormigón para muros, pilares y vigas para segundo piso.

Dentro de las actividades para Terminaciones se tienen las siguientes actividades:

Instalación de Redes de agua potable.

Canalización de corrientes débiles.

Estructura de techumbre

Cubierta y hojalatería

Dentro de las actividades para Terminaciones Finas se tienen las siguientes actividades:

Cableado

Tabiquería

Prefabricados Bowindows

Carpintería Metálica

Recorrido muros interiores

Recorrido muros exteriores

Cielos falsos y recorridos

Cerámicas pisos

Cerámicas muros

Molduras

Puertas con marcos

Pinturas

Artefactos sanitarios

Muebles de cocina

Alfombra

Papel mural

Accesorios baños

3.3.3 Supuestos

- La reducción de la duración de las actividades utilizando el criterio P(50), corresponde al 50% de la duración de la actividad, es decir si una actividad dura 10 días se asume que en promedio se completa en 5 días, esto no aplica para las actividades de obra gruesa.
- La duración de las actividades de Obra Gruesa utilizando el criterio P(50), corresponde a un 75% de la duración original, esto en base a la experiencia de ingenieros con más de 20 años en el rubro.
- Para la construcción de las casas en el proyecto original se utilizaron varios frentes de trabajo, en el ejemplo simple sólo se utilizó un frente de trabajo por tipo de actividades.
- Las actividades previas a la construcción de la obra tienen cada uno sus propios recursos y no se intervienen entre ellos, es decir no existe dependencia de recursos en las actividades previas a la construcción de la obra.
- Las actividades correspondientes al movimiento de tierras utilizan el recurso de Maquinaria 1 ("M1" en el cronograma), el cual es especializado para estas actividades, por lo tanto es necesario programar las actividades de tal forma que no se intervengan.
- Las actividades correspondientes a fundaciones y obra gruesa utilizan el recurso Frente de Trabajo 1 ("FT1" en el cronograma), el cual está especializado para estas actividades, por lo tanto es necesario programar las actividades de tal forma que no se intervengan.
- Las actividades correspondientes a Terminaciones Gruesas utilizan el Frente de Trabajo 2 ("FT2" en el cronograma), el cual está especializado para estas

actividades, por lo tanto todas las actividades correspondientes a este conjunto tienen que ser programadas de tal forma que no se intervengan.

- Las actividades correspondientes a Terminaciones Finas utilizan el Frente de Trabajo 3 ("FT3" en el cronograma), el cual está especializado para estas actividades, por lo tanto todas las actividades correspondientes a este conjunto tienen que ser programadas de tal forma que no se intervengan.

3.3.4 Cronograma CPM

A continuación se muestra parte del cronograma real de la obra, específicamente la parte de Fundaciones y Obra Gruesa.

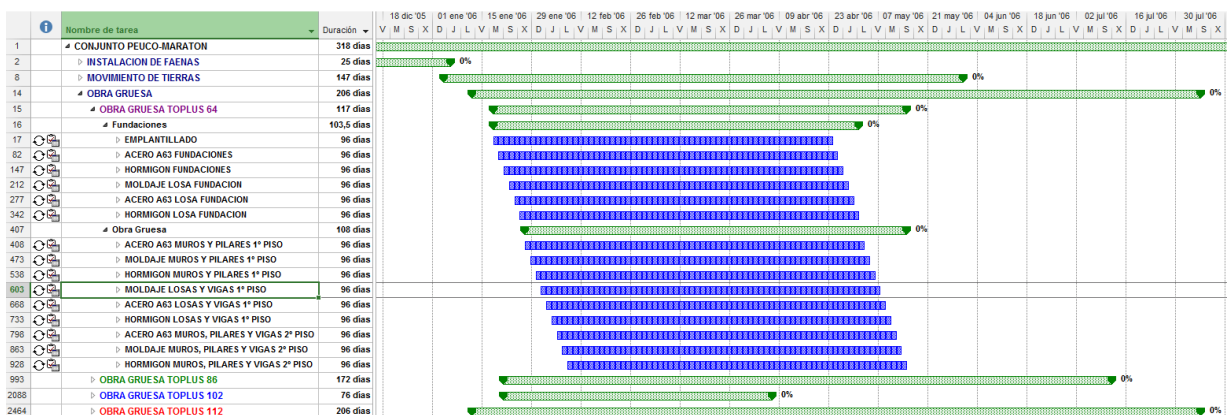


Figura 37: Proyecto conjunto habitacional Peuco Maraton.

Se puede observar la utilización de varios frentes de trabajo para la realización de las distintas actividades.

Para las fundaciones las duraciones de cada actividad se detallan a continuación:

Actividad	Duración en días
Emplantillado	1,5
Acero A63 Fundaciones	1,5
Hormigón Fundaciones	1,5
Moldaje Losa Fundación	1,5
Acero A63 Losa Fundación	1,5

Hormigón Losa Fundación	1,5
-------------------------	-----

Tabla 7 : Duraciones para actividades de fundaciones.

Son 64 casas, las fundaciones de cada casa tardan 9 días en total, pero como se puede observar se utilizan 6 frentes de trabajo, según lo que se aprecia en la Figura 37, 64 casas por 1,5 son 96 días más la dependencia de actividades $5 \times 1,5 = 7,5$ se obtiene 103,5 días.

Para la Obra Gruesa las duraciones de cada actividad se detallan a continuación:

Actividad	Duración en días
Acero A63 muros y pilares 1° piso	1,5
Moldaje muros y pilares 1° piso	1,5
Hormigón muros y pilares 1° piso	1,5
Moldaje losas y vigas 1° piso	1,5
Acero A63 losas y vigas 1° piso	1,5
Hormigón losas y vigas 1° piso	1,5
Acero A63 muros, pilares y vigas 2° piso	1,5
Moldaje muros, pilares y vigas 2° piso	1,5
Hormigón muros, pilares y vigas 2° piso	1,5

Tabla 8 : Duraciones para actividades de Obra Gruesa.

Lo mismo ocurre con la obra gruesa en donde se ocupan 9 frentes de trabajo, son 64 casas por 1,5 lo que da como resultado 96 días, luego se le suma la dependencia de actividades que es $9 \times 1,5 = 13,5$, obteniendo 108,5 días.

Finalmente, simplificando a la utilización de un frente de trabajo por grupo de actividades se obtiene el siguiente cronograma:

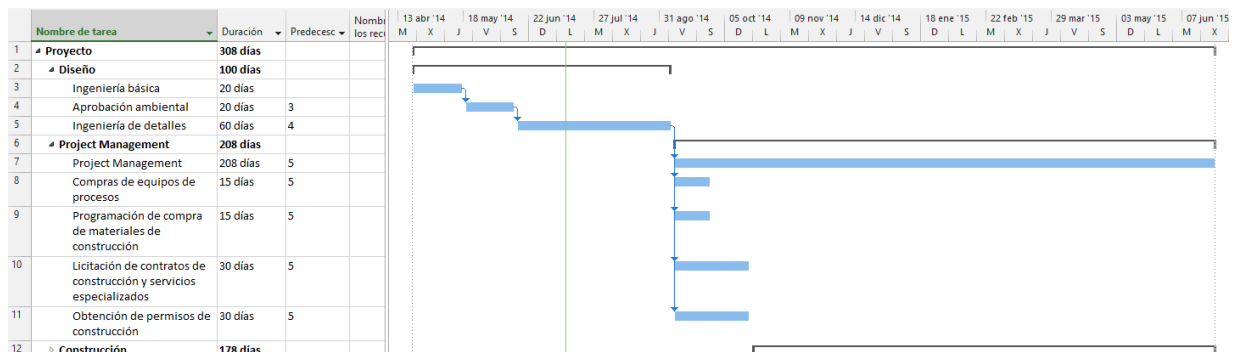


Figura 38: Etapa de diseño y Project Management simplificado

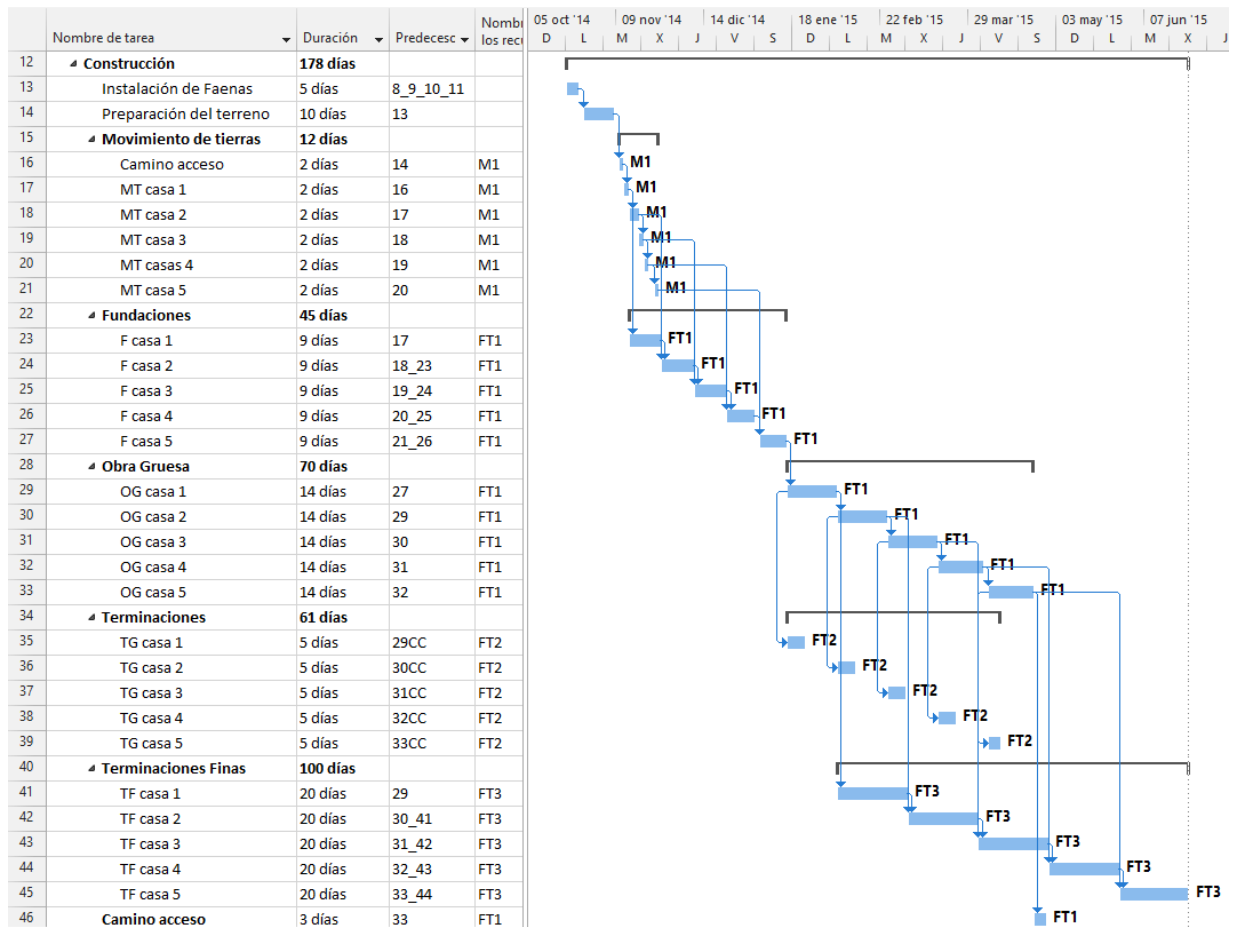


Figura 39: Etapa de construcción

3.3.5 Desarrollo por CCPM

Según la metodología expuesta en el punto 1.6.4, primero se identifica la Cadena Crítica. Para esto se reducen las duraciones de las actividades utilizando el criterio P(50), según los supuestos esto corresponde a la mitad de la duración original, salvo para las actividades de fundaciones y obra gruesa en donde corresponde al 75% de la duración original (según juicio de expertos). Luego se programan las actividades con fechas tardías, en este caso las únicas actividades afectadas son las de las terminaciones finas.

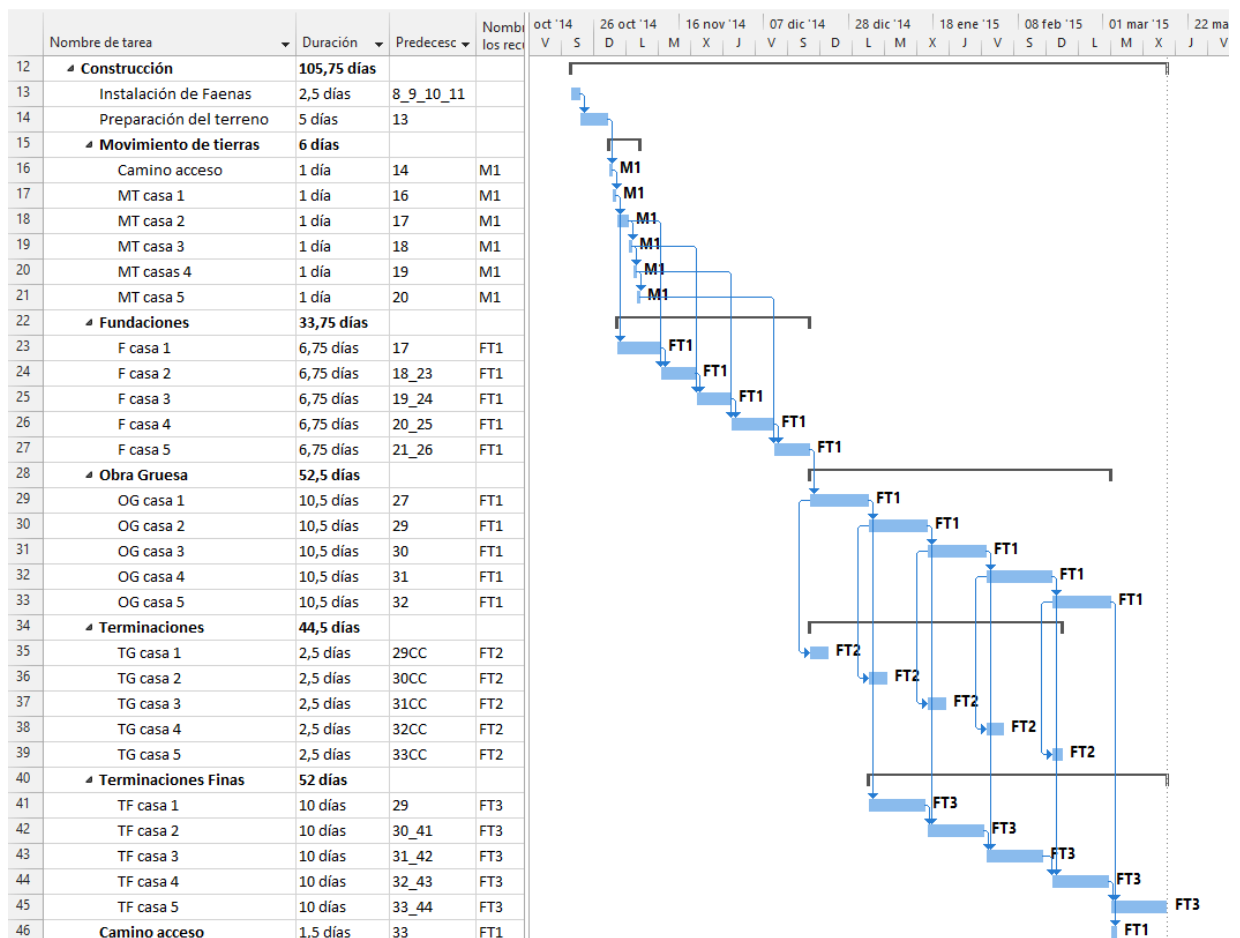


Figura 40: Cronograma simplificado con reducciones aplicando criterio P(50)

Se añade el buffer de proyecto al final de la Cadena Crítica. En este caso el Buffer de Proyecto corresponde a la mitad de las reducciones de plazo en todas las actividades, las actividades de obra gruesa para CPM tienen una duración de 178 días, en CCPM con reducción de actividades se obtiene 106 días, la diferencia es 72 días, luego el Project Buffer es de 36 días.

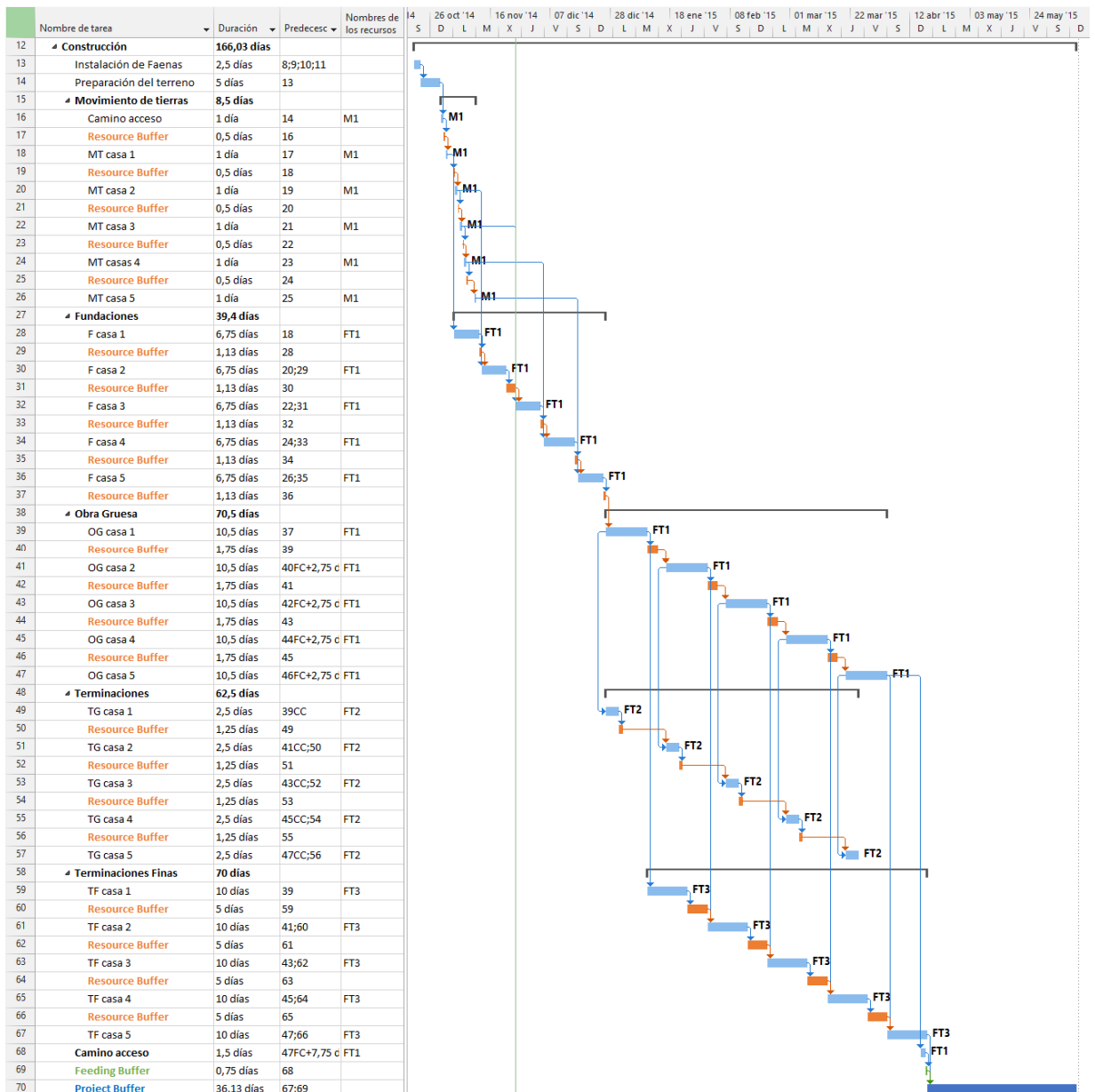


Figura 41: Proyecto simplificado de conjunto habitacional programado por metodología CCPM

3.3.6 Análisis

Por el método CPM el proyecto simplificado tiene una duración de 178 días, luego al programar por el método CCPM se tiene una duración de 130 días más un Project Buffer de 36 días.

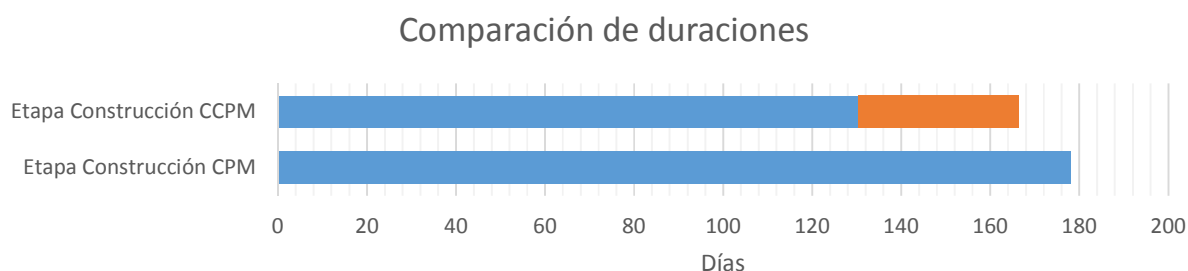


Figura 42: Comparación de duraciones para proyecto de conjunto habitacional

En la Figura 42 las barras azules representan la duración en días del proyecto programado por las dos metodologías, la barra naranja representa el Project Buffer para la metodología CCPM.

La Etapa de Construcción por la metodología CCPM corresponde a un 73% de la duración original de la Etapa de Construcción, esto sumado a un Project Buffer de 20% de la duración original. Suponiendo que se consumen todos los buffers para el proyecto programado por la metodología CCPM, se tiene una reducción del 6,52% respecto al proyecto programado por la metodología CPM.

Extrapolando al proyecto original, la etapa de construcción en donde la duración original es de 310 días, la reducción del plazo se hace a 227 días de proyecto más 63 días de Project Buffer. Suponiendo que se consumen todos los buffers en la metodología CCPM, se tiene una reducción de 20 días respecto al proyecto programado por la metodología CPM.

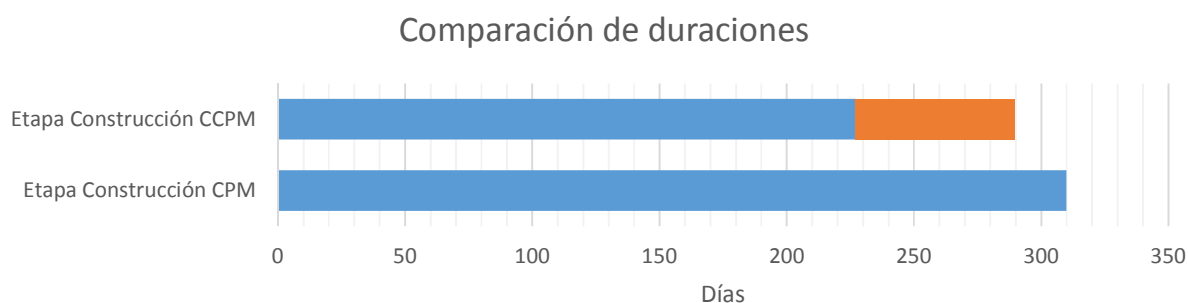


Figura 43: Comparación de duraciones extrapolado para proyecto de conjunto habitacional original

En el proyecto de conjunto habitacional utilizando la metodología CCPM, se logra obtener una disminución del tiempo planificado para concluir el proyecto, siendo este un 6,5 %

menor al plazo planificado con la metodología CPM. Esto se logra utilizando duraciones de actividades estimadas con el criterio P(50) (explicado en el punto 1.6.3) y redistribuyendo las holguras de cada actividad en Buffers insertos estratégicamente en el cronograma.

En este caso las actividades de la cadena crítica difieren de las del camino crítico por las secuencias lógicas definidas, pues las actividades de obra gruesa fueron reprogramadas lo más tardíamente posible. En cambio debido a las relaciones lógicas de CC entre las actividades de obra gruesa y terminaciones hace que la reprogramación más tardía no sea posible para estas. Esto se puede observar en la Figura 44 con el cronograma CPM y la Figura 45 con el cronograma CCPM.

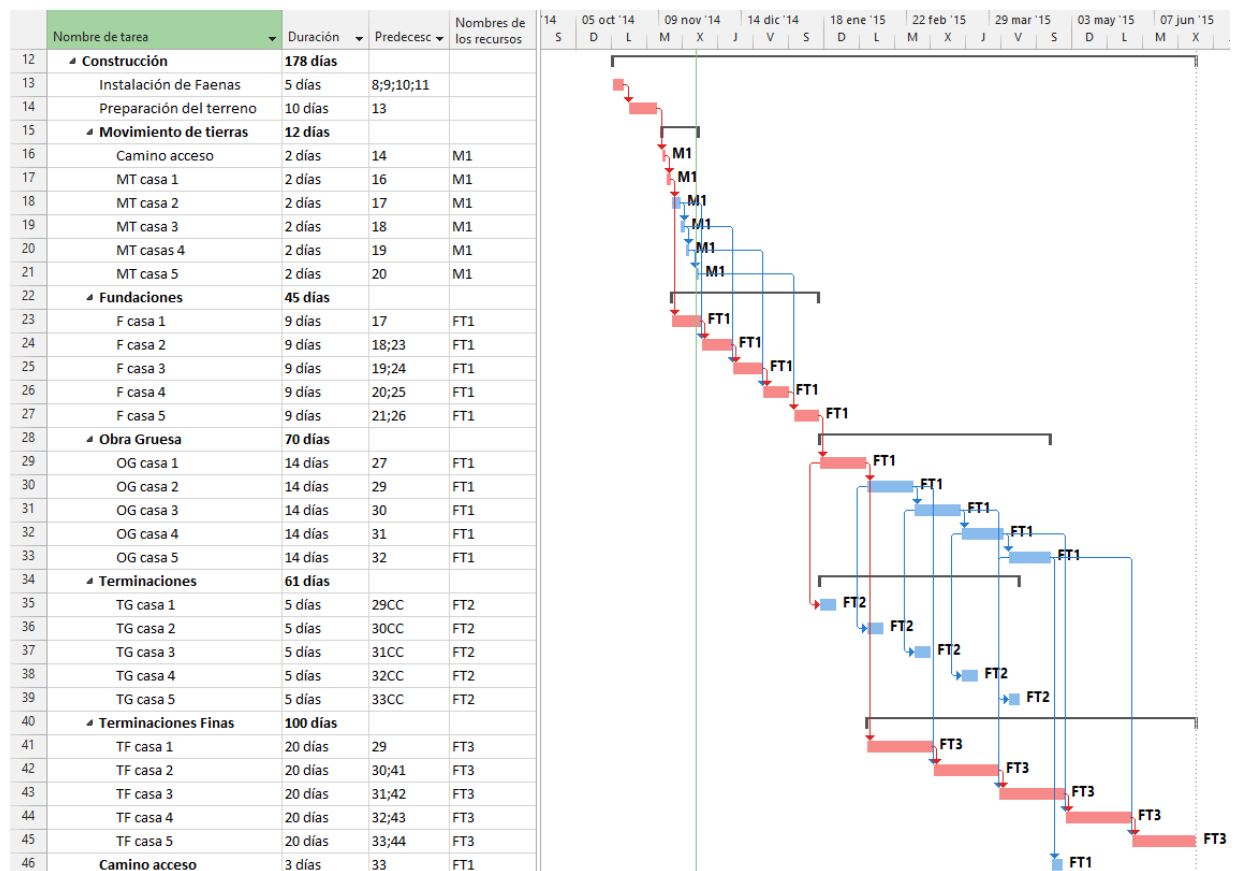


Figura 44: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.

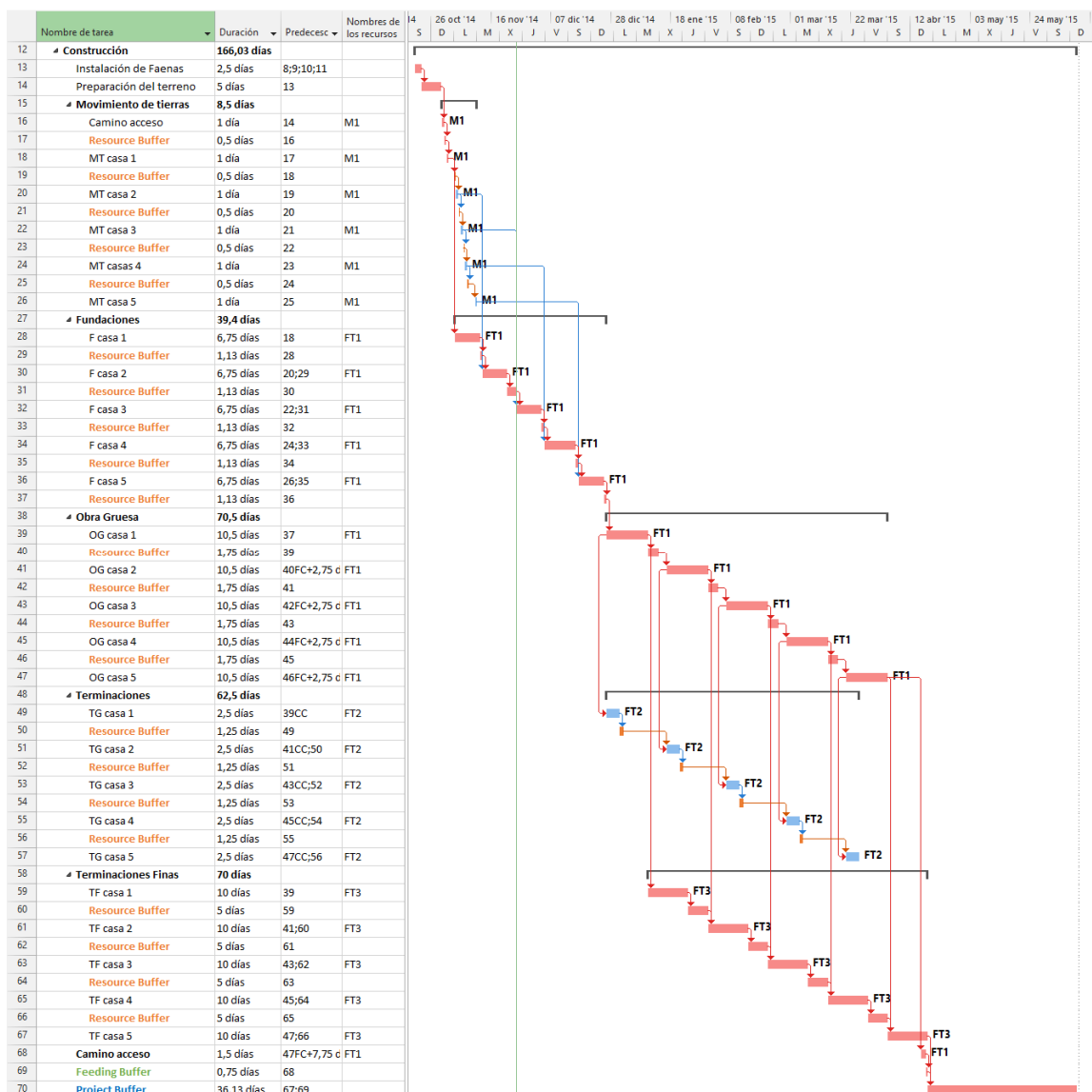


Figura 45: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.

Si bien el cronograma CCPM parece más comprimido que el cronograma CPM, hay que considerar la flexibilidad del cronograma CCPM y su capacidad de manejar las holguras de forma centralizada.

Los Resource Buffer de las actividades “Obra gruesa”, “terminaciones” y “terminaciones finas” no afectan significativamente la estructura del cronograma CCPM, esto debido a las relaciones lógicas anteriormente mencionadas. Pero aun así los Resource Buffer sirven para alertar al jefe de proyecto en caso de consumo de estos la posible existencia de retraso en las actividades.

La reducción del plazo original planificado del proyecto del 6,5 % también significa una reducción en el costo del proyecto (no cuantificado en esta memoria), pues disminuyen los gastos generales.

3.4 Proyecto de Metro

3.4.1 Descripción

El siguiente proyecto se basa en un pique de acceso y túnel interestación de Metro de Santiago, este proyecto tiene una duración planificada de 350 días.

El pique tiene un diámetro de 15 m, tiene una profundidad aproximada de 20 m y una Galería de Acceso que conecta con el túnel interestación. Al túnel interestación se accede directamente desde el pique.

El material que se retirará durante la excavación para esta obra es de 8.284,29 m³.

En este proyecto se utilizó el método NATM (New Austrian Tunneling Method), que consiste en la construcción de interestaciones por tuneado, es decir, sin abrir la superficie. Gracias a este método de construcción, Metro de Santiago puede construir túneles en la ciudad a distintos niveles minimizando las perturbaciones a la comunidad y haciendo más eficiente la construcción.

3.4.2 Actividades principales

Dentro de las actividades principales se tienen las siguientes:

Etapa de Construcción
Pique Circular
Túnel Inter Estación Poniente
Excavación y Sostenimiento de Túnel Estocada
Excavación y Sostenimiento de Túnel Interestación
Túnel Inter Estación Oriente
Excavación y Sostenimiento de Túnel Estocada
Excavación y Sostenimiento de Túnel Interestación

Tabla 9 : Actividades principales para proyecto de metro.

3.4.3 Supuestos

- Los recursos en el cronograma original son los siguientes: “Material Resources”, “Horas Hombre” y “Horas máquina” especificados por unidades en cada una de las actividades. Para efectos del cronograma simplificado se trabajará con los siguientes frentes de trabajo que incluyen materiales necesarios, horas hombres y maquinaria:

Frente de trabajo 1 y 2 (FT1, FT2): se designará este tipo de frente de trabajo a las actividades de Instalación de Faenas, Brocal, Anillo Superior, Excavación y sostenimiento para manto superior, Excavación y sostenimiento para manto inferior, Paraguas Ojo Túnel, Demolición Ojo Túnel, Anillo de Fundación,

Revestimiento y Desarme de Instalación de Faenas. Para cumplir con el cronograma es necesario contar con 2 frentes de trabajos, el FT1 contará con 3 equipos de trabajo que se denominarán FT1A, FT1B y FT1C, el FT1 contará con 2 equipos de trabajo denominados FT2A y FT2B.

Frente de trabajo tipo 3 (FT3): se designará este tipo de frente de trabajo a las actividades de instalación de soleras laterales y colocación de radier. Para cumplir con el cronograma es necesario contar con 3 equipos de trabajo que se denominarán FT3A, FT3B, FT3C y FT3D.

- Al simplificar el cronograma se agruparon varias etapas de excavación y sostenimiento con la finalidad de reducir el número de actividades, estas simplificaciones se podrán apreciar en el punto de proyecto programado por CPM.
- Las actividades Brocal, Anillo Superior, Paraguas Ojos Túneles, Anillo de Fundación y Demolición Ojo Túnel no pueden ser reducidas debido a motivos constructivos. Esto en base a los testimonios de Ingeniero con más de 3 años de experiencia en terreno en obras de metro.
- Las relaciones de precedencias entre las actividades 16 y 14, 19 y 18, 21 y 19, 24 y 13, 26 y 25, 30 y 29, 32 y 30, 33 y 32 tienen espacios de días en sus relaciones de precedencia. Se supondrá que estos días NO pueden ser reducidos al momento de disminuir la duración de las actividades al 50% de probabilidad de ocurrencia, por motivos constructivos.

3.4.4 Cronograma CPM

A continuación se presenta el proyecto original sin simplificar.

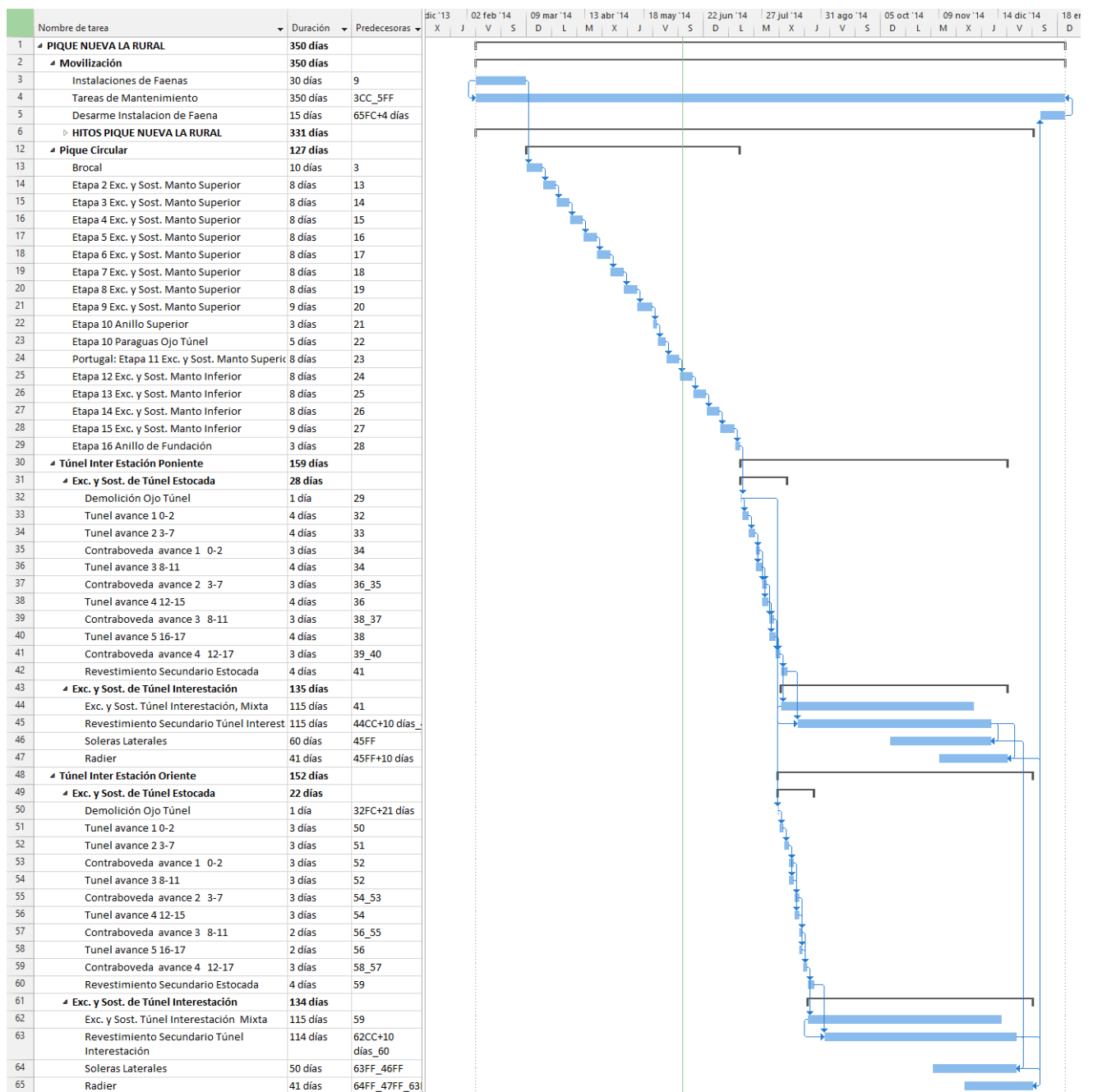


Figura 46: Proyecto de Pique de Acceso y túnel interestación sin simplificar

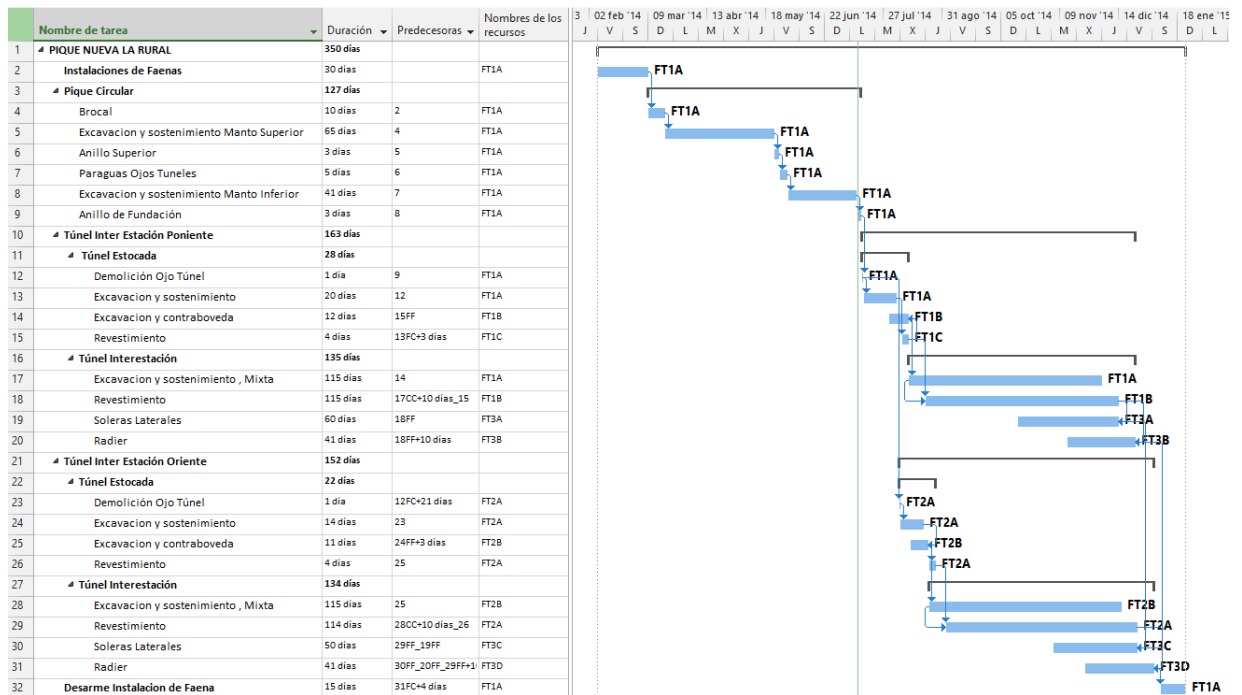


Figura 47: Proyecto de metro simplificado, con asignación de recursos según supuestos

3.4.5 Desarrollo por CCPM

Según la metodología expuesta en el punto 1.6.4, primero se identifica la Cadena Crítica. Para esto se reducen las duraciones de las actividades aplicando el criterio P(50). Luego se programan las actividades con fechas tardías.

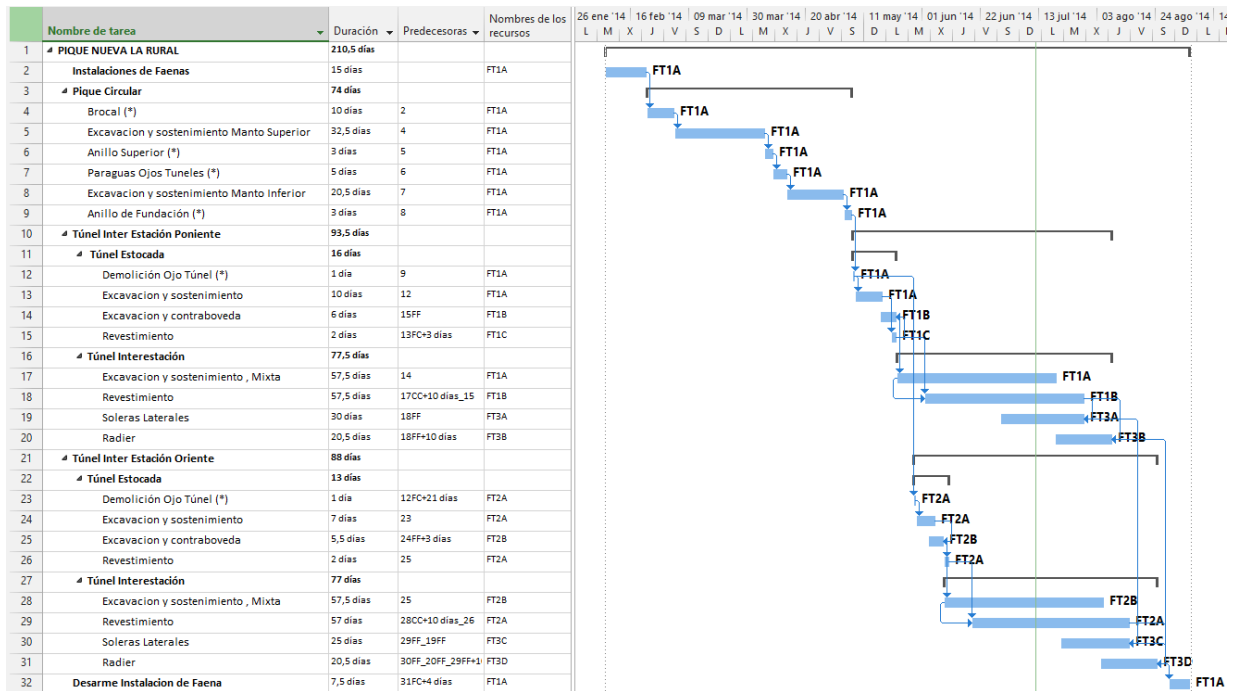


Figura 48: Proyecto de metro simplificado con actividades reducidas utilizando criterio P(50)

En la Figura 47 se aprecian las actividades en donde el criterio P(50) de reducción de la duración de las actividades no aplica, estas están marcadas con (*).

Se añade el buffer de proyecto al final de la Cadena Crítica. En este caso el Buffer de Proyecto corresponde a la mitad de las reducciones de plazo en todas las actividades pertenecientes a la cadena crítica, las actividades de obra gruesa para CPM tienen una duración de 350 días, en CCPM con reducción de actividades se obtiene 210,5 días, la diferencia es 139,5 días, luego el Project Buffer es de 70 días.

Se crea una nueva relación de precedencia entre el Resource Buffer (16) que protege a la actividad Excavación y sostenimiento (15) y la actividad Excavación y sostenimiento, Mixta (21).

Se crea una nueva relación de precedencia entre el Resource Buffer (18) que protege a la actividad Excavación y contraboveda (17), y Revestimiento (22).

Se crea una nueva relación de precedencia entre el Resource Buffer (29) que protege a la actividad Excavación y sostenimiento (28), y la actividad Revestimiento (31).

Las relaciones de dependencia entre las actividades no deja actividades disponibles para reprogramar lo más tardíamente posible.

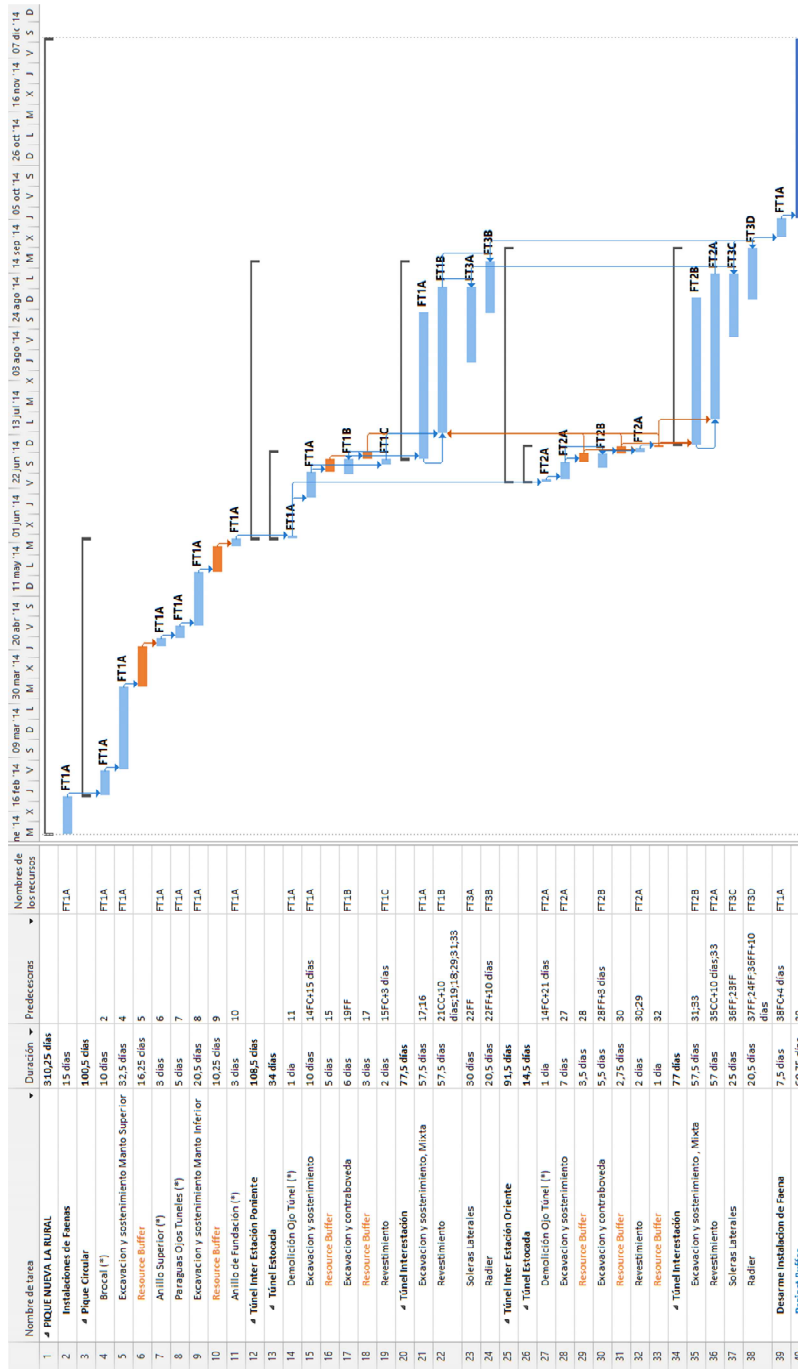


Figura 49: Proyecto de metro simplificado con todos los Buffers insertados

3.4.6 Análisis

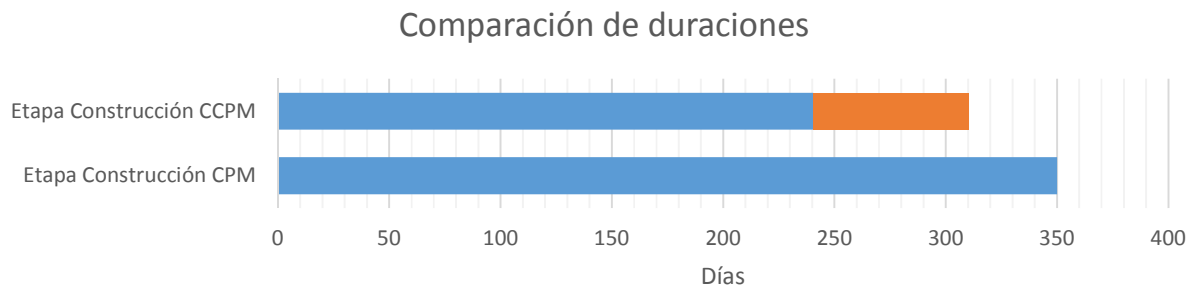


Figura 50: Comparación de duraciones para proyecto de metro pique y túnel interestación

En la Figura 50 las barras azules representan la duración en días del proyecto programado por las dos metodologías, la barra naranja representa el Project Buffer para la metodología CCPM.

La Etapa de Construcción por la metodología CCPM corresponde a un 69% de la duración original de la Etapa de Construcción, esto sumado a un Project Buffer de 20% de la duración original. Suponiendo que se consumen todos los buffer para el proyecto programado por la metodología CCPM se tiene una reducción del 11,4% respecto a al proyecto programado por la metodología CPM.

En el proyecto de metro utilizando la metodología CCPM, se logra obtener una disminución del tiempo planificado para concluir el proyecto, siendo este un 11,4 % menor al plazo planificado con la metodología CPM. Esto se logra utilizando duraciones de actividades estimadas con el criterio P(50) (explicado en el punto 1.6.3) y redistribuyendo las holguras de cada actividad en Buffers insertos estratégicamente en el cronograma.

En este caso las actividades de la cadena crítica difieren de las del camino crítico por las secuencias lógicas definidas, pues las actividades de “Túnel Inter Estación Poniente” fueron reprogramadas lo más tardíamente posible. En cambio debido a las relaciones lógicas de FF entre las actividades de “soleras radier” y “revestimiento” hace que la reprogramación más tardía no sea posible para estas. Esto se puede observar en la Figura 51 con el cronograma CPM y la Figura 52 con el cronograma CCPM.

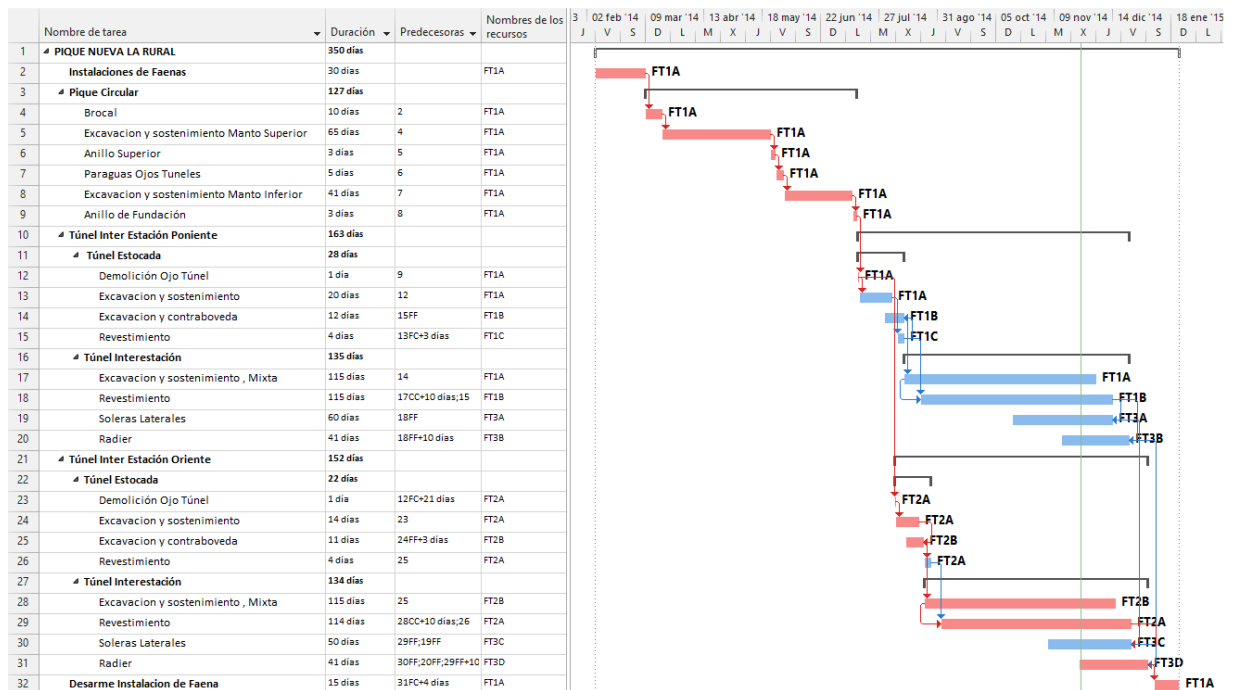


Figura 51: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.

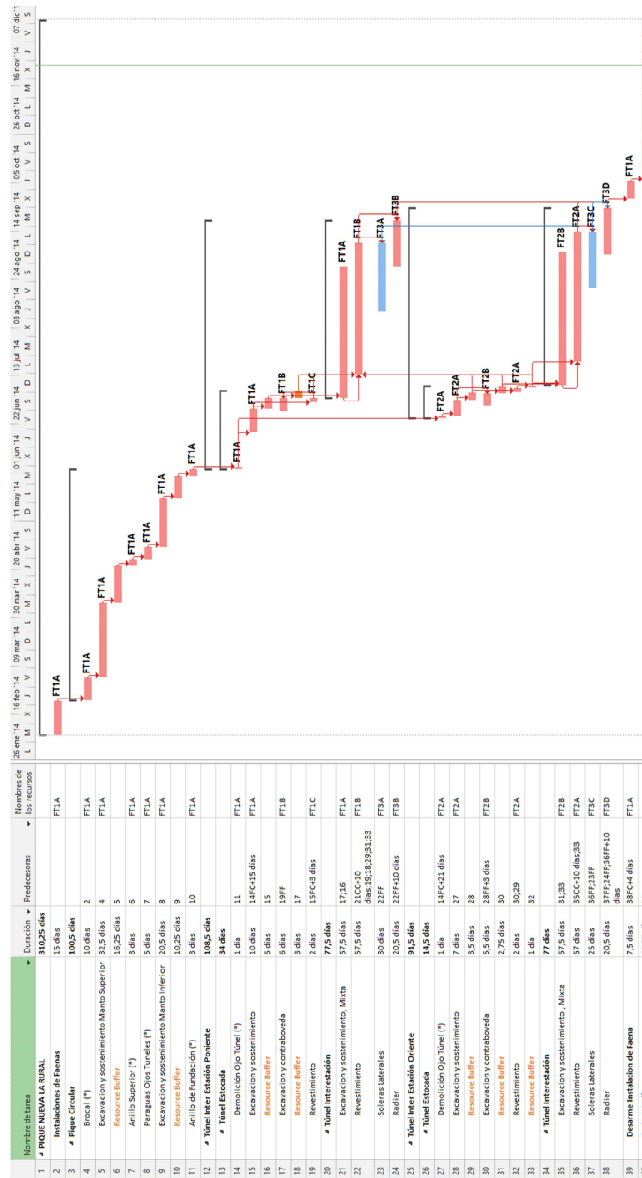


Figura 52: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.

Si bien el cronograma CCPM parece más comprimido que el cronograma CPM, hay que considerar la flexibilidad del cronograma CCPM y su capacidad de manejar las holguras de forma centralizada.

Los Resource Buffer de las actividades “Túnel Estocada” y “Túnel Inter Estación” no afectan significativamente la estructura del cronograma CCPM, esto debido a las relaciones lógicas anteriormente mencionadas. Pero aun así los Resource Buffer sirven para alertar al jefe de proyecto en caso de consumo de estos la posible existencia de retraso en las actividades.

La reducción del plazo original planificado del proyecto del 11,4 % también significa una reducción en el costo del proyecto (no cuantificado en esta memoria), pues disminuyen los gastos generales.

3.5 Proyecto de camino

3.5.1 Descripción

El siguiente proyecto se basa en un proyecto de mejoramiento de ruta en varios tramos en la Región de los Ríos.

El proyecto está compuesto por dos tramos discontinuos de 13.8 y 9.6 Km respectivamente, considera básicamente el mejoramiento geométrico, pavimento asfáltico del tipo “cape seal” y la construcción de nueve puentes de entre 24 y 50 m. de longitud.

Para efectos de la memoria se analizará el tramo que comprende el DM 1.800 al DM 4.660 de la ruta principal, este tramo corresponde a un área rural.

3.5.2 Actividades principales

Dentro de las actividades principales se tienen las siguientes:

Etapa de Construcción
Movimientos de Tierra
Capas granulares
Revestimientos y pavimentos
Estructuras y Obras conexas
Drenaje y protección de la plataforma
Elementos de control y seguridad
Obras varias

Tabla 10 : Actividades principales para proyecto de camino.

3.5.3 Supuestos

- La actividad “Pavimentación” contiene las siguientes actividades:

Imprimación

Riego de liga

Riego de liga con polímero

Cape seal

Base asfáltica en caliente de graduación gruesa

Base asfáltica en caliente densa

Concreto asfáltico de rodadura semi-denso

Mezcla asfáltica reciclada y estabilizada con asfalto espumado

Mezcla asfáltica drenante

- La actividad “Señalización” incluye la instalación de señalética, demarcación de pavimento, instalación de tachas reflectantes e instalación de valla peatonal.

3.5.4 Cronograma CPM

A continuación se presenta el cronograma del proyecto de camino simplificado programado por CPM.

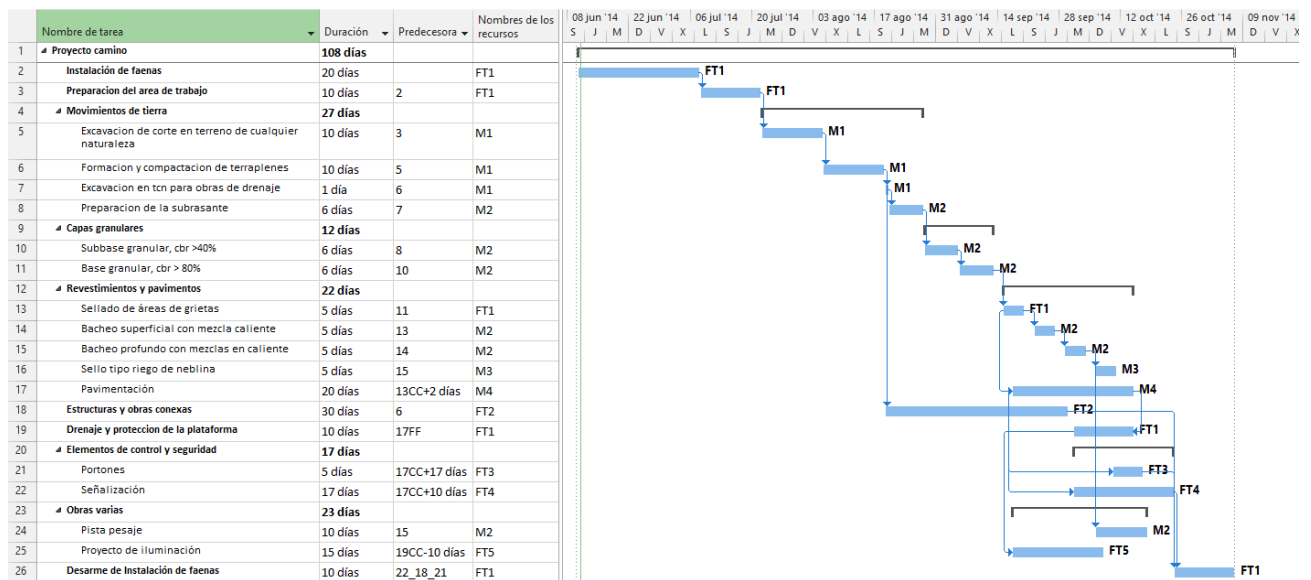


Figura 53: Proyecto de camino simplificado programado por CPM

3.5.5 Desarrollo por CCPM

Según la metodología expuesta en el punto 1.6.4, primero se identifica la Cadena Crítica. Para esto se reducen las duraciones de las actividades utilizando el criterio P(50), según los supuestos esto corresponde a la mitad de la duración. Luego se programan las actividades con fechas tardías.

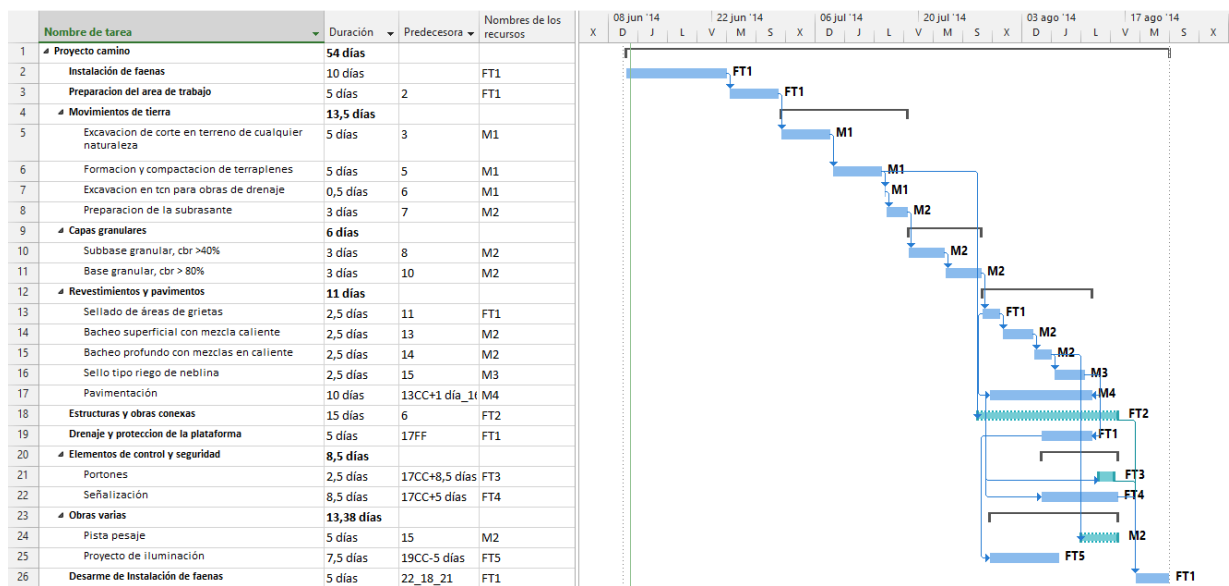


Figura 54: Proyecto de camino con duraciones de actividades reducidas y actividades programadas lo más tarde posible.

Como se observa en el Cronograma 12 sólo las actividades “Estructuras y obras conexas”, “Portones” y “Pista pesaje” pueden ser reprogramadas lo más tarde posible, el resto de las actividades están sujetas a restricciones por relaciones de precedencia.

Insertando Buffers, el cronograma queda como sigue:

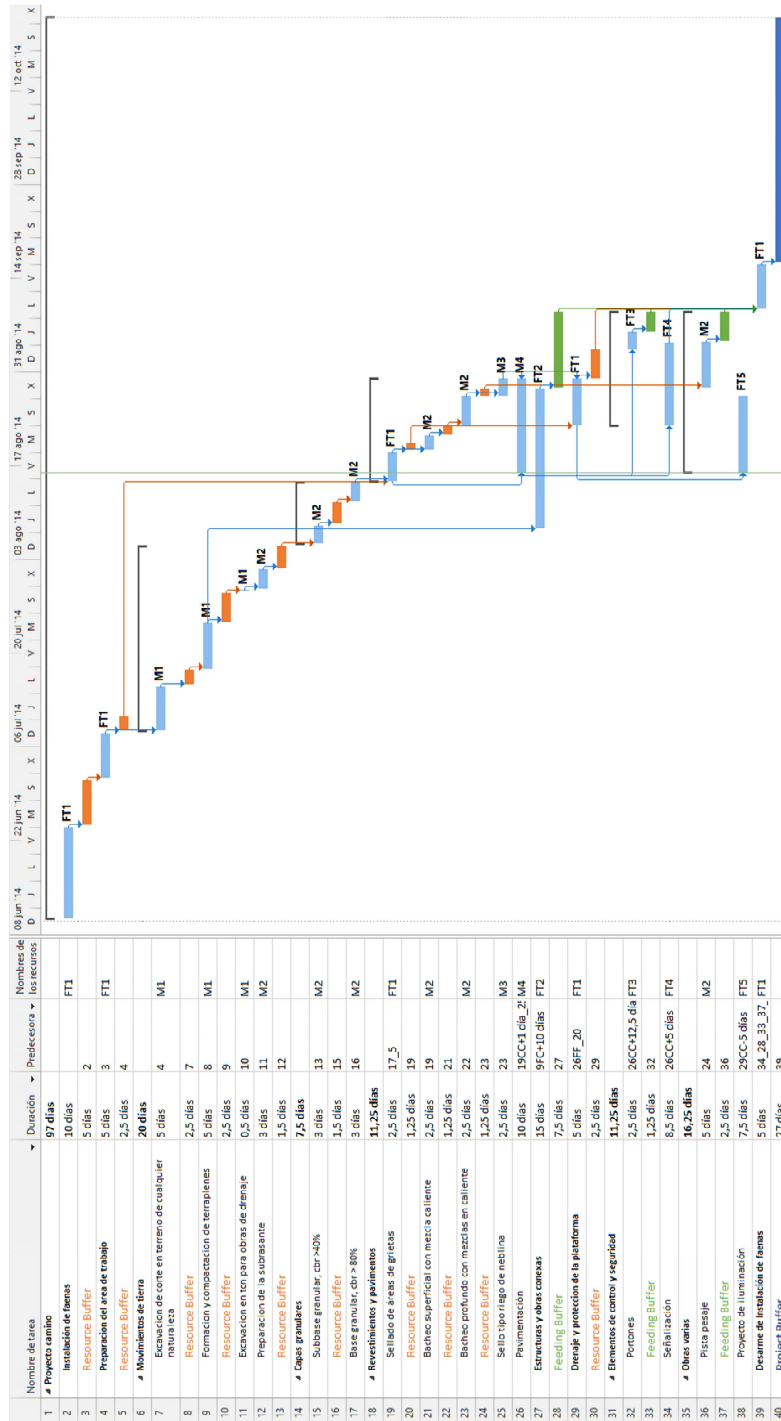


Figura 55: Proyecto de camino programado con CCPM

3.5.6 Análisis

Por el método CPM el proyecto simplificado tiene una duración de 108 días, luego al programar por el método CCPM se tiene una duración de 70 días más un Project Buffer de 27 días.

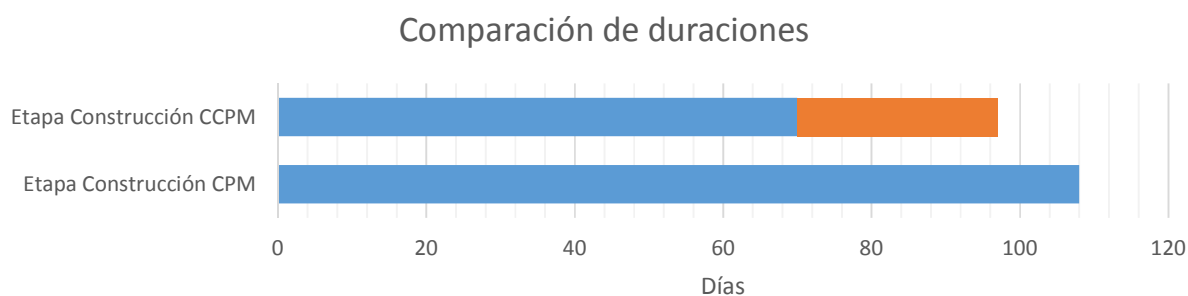


Figura 56: Comparación de duraciones para proyecto de camino

En el gráfico 1 las barras azules representan la duración en días del proyecto programado por las dos metodologías, la barra naranja representa el Project Buffer para la metodología CCPM.

La Etapa de Construcción por la metodología CCPM corresponde a un 65% de la duración original de la Etapa de Construcción, esto sumado a un Project Buffer de 25% de la duración original. Suponiendo que se consumen todos los buffers para el proyecto programado la metodología CCPM se tiene una reducción del 10,2% respecto al proyecto programado por la metodología CPM.

Extrapolando al proyecto completo es decir los 23,4 kilómetros con 4 frentes de trabajo, la etapa de construcción en donde la duración original es de 221 días, la reducción del plazo se hace a 143 días de proyecto más 55 días de Project Buffer. Suponiendo que se consumen todos los buffers para el proyecto programado por CCPM se tiene una reducción de 23 días respecto al proyecto programado por la metodología CPM.

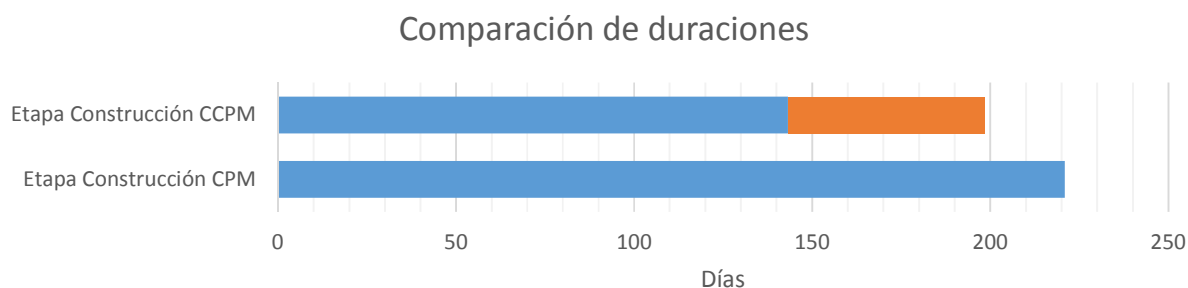


Figura 57: Comparación de duraciones para proyecto de camino extrapolado a proyecto completo

En el proyecto de camino utilizando la metodología CCPM, se logra obtener una disminución del tiempo planificado para concluir el proyecto, siendo este un 11,2 % menor al plazo planificado con la metodología CPM. Esto se logra utilizando duraciones de actividades estimadas con el criterio P(50) (explicado en el punto 1.6.3) y redistribuyendo las holguras de cada actividad en Buffers insertos estratégicamente en el cronograma.

En este caso las actividades de la cadena crítica difieren de las del camino crítico por las secuencias lógicas definidas, pues las actividades de “Estructuras y obras conexas” y “Portones” fueron reprogramadas lo más tardíamente posible. En cambio debido a las relaciones lógicas de FF entre “Drenaje y protección de la plataforma” y “pavimentación” y las relaciones de CC entre “señalización”, “pavimentación”, “proyecto de iluminación” y “Drenaje y protección de la plataforma” hace que la reprogramación más tardía no sea posible para estas. Esto se puede observar en la Figura 58 con el cronograma CPM y la Figura 59 con el cronograma CCPM.

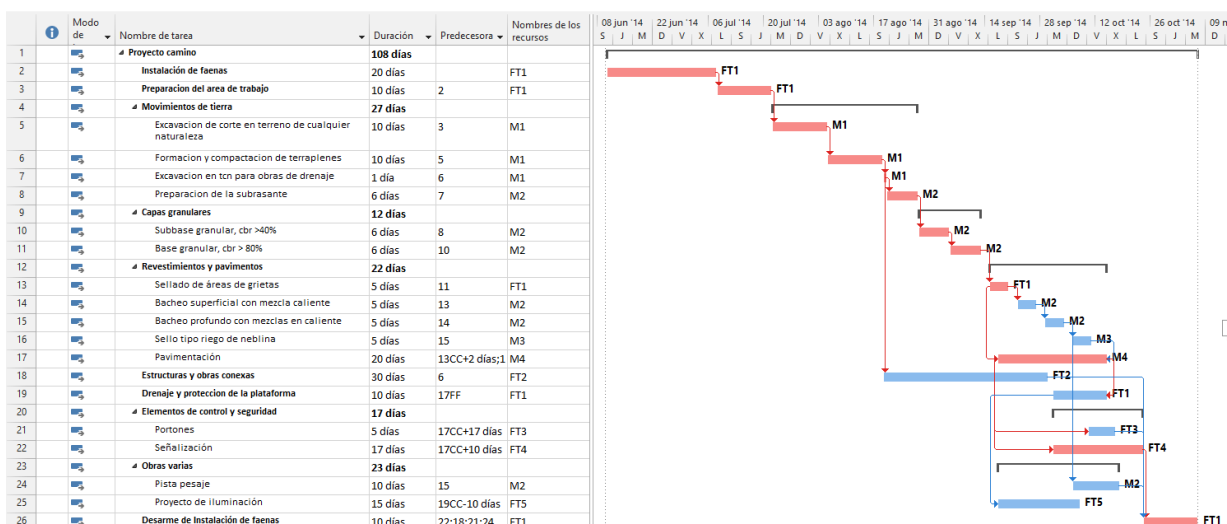


Figura 58: Cronograma CPM con actividades críticas en rojo.

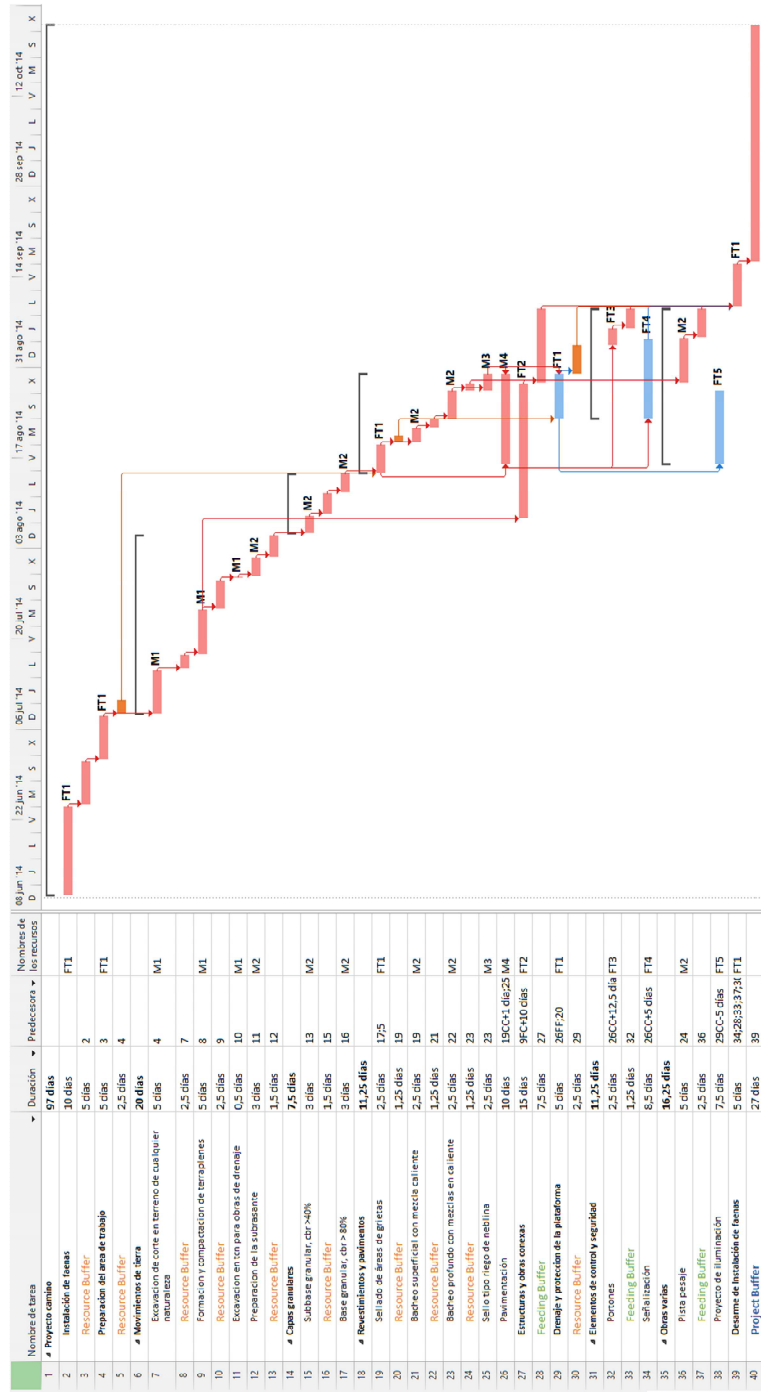


Figura 59: Cronograma CCPM con actividades críticas en rojo.

Si bien el cronograma CCPM parece más comprimido que el cronograma CPM, hay que considerar la flexibilidad del cronograma CCPM y su capacidad de manejar las holguras de forma centralizada.

El Resource Buffer situado entre las actividades “Drenaje y proteccion” y “Desarme de Instalación de faenas” de la plataforma no afecta significativamente la estructura del cronograma CCPM, esto debido a las relaciones lógicas anteriormente mencionadas. Pero aun así el Resource Buffer sirve para alertar al jefe de proyecto en caso de consumo de este la posible existencia de retraso en las actividades.

La reducción del plazo original planificado del proyecto del 11,2 % también significa una reducción en el costo del proyecto (no cuantificado en esta memoria), pues disminuyen los gastos generales.

4 Análisis de Aplicabilidad, Beneficios y Conclusiones

4.1 Introducción al capítulo

En el presente capítulo se expone un resumen de los resultados obtenidos en el Capítulo 2 “Análisis de proyectos tipos con CPM y CCPM” y un análisis de aplicabilidad en los proyectos analizados. Finalmente se expondrán los beneficios y conclusiones de ambos métodos.

4.2 Resumen de resultados y análisis de aplicabilidad teórica a proyectos

A continuación en la Tabla 11 se presenta un resumen de los resultados obtenidos luego de aplicar la metodología a los diversos proyectos.

Proyecto	Reducción		
	Porcentual	Simplificada (días)	Extrapolada (días)
Edificio	7,5	7,6	33,3
Conjunto Habitacional	6,5	11,6	20,2
Pique y túnel de Metro	11,4	39,8	39,8
Camino	10,2	11,0	22,5

Tabla 11: Resumen de resultados de la aplicación de CCPM a los proyectos tipo.

En el proyecto en que mayor reducción de plazo se obtuvo fue en el proyecto de Metro, con un 11,4% de reducción en el plazo. Cabe destacar que este proyecto es el que tiene y generó más restricciones constructivas al momento de programarlo por la metodología CCPM (restricciones de recursos).

En el proyecto que se tuvo una menor reducción en el plazo fue el proyecto de conjunto habitacional con un 6,5%.

Se observa que los proyectos con naturaleza lineal y repetitiva presentan reducciones similares y estas son mayores a las de los otros tipos de proyectos.

Las reducciones de plazo obtenidas en los resultados resultan ser cercanas a los resultados obtenidos en proyectos en donde se ha aplicado la metodología.

La variación de los resultados teóricos obtenidos depende netamente de las combinaciones de las relaciones de precedencias entre las actividades y la aplicabilidad del criterio P(50).

En cuanto a la aplicabilidad de la metodología depende, según testimonios de ingenieros, en la mente del jefe de proyecto se consideran muchos factores, los cuales consideran de cierta forma las desventajas que presenta la metodología CPM sobre la CCPM.

4.3 Beneficios:

4.3.1 Duración flexible para las actividades

La metodología CCPM considera que las actividades tienen duraciones variables, esto es apreciado en la práctica. Al contrario la metodología CPM considera que las actividades tienen duraciones determinísticas, lo cual en la práctica es poco probable.

4.3.2 Consideración de problemas de comportamiento humano

La metodología CCPM considera los problemas de comportamiento humano (Capítulo 3, punto 3.6) en su filosofía de gestión de proyectos. Entre ellos destacan el síndrome del estudiante, la ley de parkinson y la consideración de la curva de aprendizaje. En cambio la metodología CPM no considera estos problemas.

4.3.3 Manejo de holguras a través de Buffers controlados por jefe de proyecto

El tradicional método CPM utiliza márgenes de seguridad insertas dentro de cada una de las actividades, permitiendo que estos márgenes sean manejadas por los encargados de las actividades e incluso los mismos operarios. Esto es una gran desventaja, pues en la práctica la productividad de las actividades se ve disminuida por los problemas de comportamiento humano mencionados en el capítulo 3, que si considera la metodología CCPM.

4.3.4 Consideración explícita de la dependencia de recursos

EL método CCPM establece Buffers de Recursos que permiten alertar cuando un recurso será utilizado en una actividad posterior. La dependencia de recursos no es tratada explícitamente en la metodología CPM.

4.3.5 Protección de la cadena crítica de actividades mediante el uso de Feeding Buffers

El método CCPM establece Feeding Buffers para proteger a la cadena crítica de las cadenas que la alimentan y sus variaciones en las duraciones.

Estas cadenas que alimentan a la cadena crítica pueden contener actividades que dependen netamente de factores externos al proyecto, por ejemplo los permisos de construcción, su incertidumbre puede ser gestionada mediante el uso de Feeding Buffers dimensionados en base a la experiencia del programador, protegiendo explícitamente a la cadena crítica de actividades.

4.3.6 Aumento de productividad limitando la multitarea

La filosofía de la metodología de CCPM, establece que la multitarea puede traer efectos negativos importantes para los proyectos.

Ejemplo de referencia 13 en la página 44.

“Considere una persona que hace actividades que duran una semana para tres proyectos diferentes. Si la persona se le permitiera trabajar exclusivamente en cada una, el primer proyecto lo tendría listo en la primera semana, el segundo en la segunda semana y el tercero en la tercera semana. Sin embargo, si las actividades se realizan de manera simultánea, en donde el trabajador avanza un tercio de cada actividad por semana, recién tendría listas las tres actividades al final de la tercera semana. Todas las 3 actividades tendrán una duración de 3 semanas, potencialmente extendiendo la duración de cada proyecto individual.

Si la multitarea es una forma normal en una empresa, tres semanas se vuelve la duración normal de la actividad. Luego en el historial de la compañía de negocios se almacena que esa actividad tiene una duración de tres semanas, es decir una duración sobreestimada. Si esta actividad pertenece a la cadena crítica, en la práctica extiende directamente la duración del proyecto. La mayoría de las compañías reconoce que fomentan la multitarea.”

4.3.7 Experiencias prácticas de aplicación en proyectos

La bibliografía muestra experiencias en donde la metodología CCPM ha tenido reducciones de plazo y aumento de productividad en la ejecución de proyectos.

Ejemplos:

Bibliografía 14.

“Comparison between Critical Chain and Critical Path method in telecommunication Tower construction Project Management” 2009, Indonesia.

La comparación se hizo al construir una serie de torres de telecomunicaciones con la metodología CPM y otra serie con la metodología CCPM. Resulto ser que por CPM la duración fue 207 días y por CCPM 197,75 días. Una reducción del 4,5% del plazo original.

Bibliografía 18.

“The Application of SDPM, Critical Chain and Portfolio Project Management Principles to the Construction of the 670 km Urucu/Manaus” 2008, EEUU.

En este proyecto se utiliza una metodología basada en CCPM, en donde se demuestra cómo la redistribución de maquinaria y personal a las áreas más críticas del proyecto, lleva a mejorar la productividad general del proyecto.

Bibliografía 18.

“Critical Chain Project Management, Second Edition” 2004, EEUU.

En la página 19 de este libro, se exponen una serie de ejemplos en donde la metodología ha tenido resultados exitosos respecto a CPM. Estos proyectos pertenecen a otras áreas de la ingeniería como la aeronáutica, la informática, gestión de sistemas de mantenimiento y cadenas de montaje.

Texto complementario “Critical Chain Project Management – CCPM”

2008, GIC-Europe / Velocity Management Group

Al final del documento se exponen resultados Internacionales de la aplicación de la metodología CCPM, entre las cuales destacan por ser proyectos de ingeniería civil.

-Proyecto: "Oil & Gas Platform Desing & Manufacturing"

Empresa: LeToumeau Technologies, Inc.

El tiempo de diseño de la plataforma petrolera solía tomar por CPM 15 meses, luego aplicando CCPM el diseño solo tomo 9 meses.

-Proyecto: "Iron Ore Asset Development Projects, BHP Billiton" Septiembre 28 de 2005, EEUU.

www.bhpbilliton.com/

Se logró ejecutar un proyecto de expansión de capacidad en "BHP Billiton Iron Ore's facilities" en Port Hedland, Australia 3 semanas antes y con un 20% menos de instrumentación e ingenieros de control de lo que se requería en la planificación original. La metodología de la Cadena Crítica permitió centrar la atención en áreas del proyecto que hasta entonces no se les había tomado el peso suficiente, evitando así "cuellos de botella".

4.4 Conclusiones

4.4.1 Conclusiones generales sobre la metodología CCPM.

El CPM es un método esencialmente "estático", que a través de la definición y análisis de las relaciones lógicas entre las actividades, permite definir la secuencia o camino crítico y con ello la duración del proyecto. Sin embargo la duración total depende de los supuestos realizados y fundamentalmente de la estimación de la duración de las actividades, muchas veces conservadora y otras veces errónea.

El nivel real de utilización de la metodología CPM ocurre en grandes proyectos de inversión y con muchas actividades. En estos casos también hay muchos cambios, mucha pérdida de tiempo y recursos en las actividades no críticas y es común que el camino crítico cambie mes a mes. Es una práctica habitual entre los profesionales de los proyectos el decir que el cronograma CPM es el cronograma de como NO se realizará el proyecto, esto indica un bajo nivel de confianza en la utilidad práctica del CPM.

El CCPM es un método más realista y aplicado a las problemáticas comunes de la ejecución de proyectos de ingeniería y construcción. El CCPM se enfoca a identificar y resolver los "cuellos de botella", es decir las actividades que limitan y atrasan una secuencia completa de actividades. El CCPM por otra parte es más exigente al utilizar valores de las duraciones de las actividades menores que el CPM. A cambio y a nivel del proyecto y secuencias de actividades incorpora buffers ("colchones") de duraciones para tomar en cuenta los posibles atrasos o menor productividad.

Este enfoque es mucho más útil para efectos del seguimiento y control, pues permite un manejo centralizado de las holguras de tiempo y con ello logra ser más efectiva en el uso

del recurso tiempo. Si bien existe una metodología CCPM desarrollada y analizada por diferentes autores, e incluso muchas experiencias exitosas de aplicación a proyectos, el principal desafío en su aplicación es el cambio cultural que requiere.

4.4.2 Conclusiones de la aplicabilidad del CCPM.

La aplicación exitosa del método CCPM requiere al menos abordar los desafíos y particularidades asociadas a:

- Condiciones contractuales con respecto al plazo, bonos y multas.
- Información histórica y válida respecto a las duraciones de las actividades.
- Cambio cultural

Como esencialmente CCPM entrega un cronograma dinámico pueden existir conflictos con la necesidad de tener fechas fijas estipuladas para los contratos. De todas formas la experiencia indica que la metodología CPM suele estar retrasada o desfasada con el cumplimiento de las fechas individuales de los contratos, exponiendo al proyecto a multas que pueden llegar a ser muy altas.

Se trabaja con duraciones a la baja (reducidas), estas duraciones corresponden al 50% de probabilidad de ocurrencia del evento actividad completa.

La literatura recomienda que la duración de la actividad reducida al 50% de probabilidad de ocurrencia sea la mitad de la duración con 90% de probabilidad de ocurrencia. Esto suponiendo que en CPM las duraciones de las actividades corresponden al 90% de probabilidad de ocurrencia.

Sin embargo es necesario recurrir a la experiencia para determinar si el criterio de reducción de actividades al 50% de la duración original. Pues este criterio podría no ser aplicable para todas las actividades.

La metodología CPM lleva más de 50 años de aplicación en los proyectos de Ingeniería y Construcción, lo cual hace difícil que CCPM que tiene tan solo 17 años sea aceptado por las personas y la comunidad profesional, sobre todo con la filosofía marcadamente diferenciada de CPM.

Al reducirse los plazos de los proyectos aumentando la eficiencia, se expone a la posibilidad de que los trabajadores tengan tendencia a demorar la obra. Por ejemplo:

Un capataz que tome la decisión de retrasar el proyecto con la finalidad de hacerlo durar más, obteniendo mayor tiempo de contrato para él y sus trabajadores.

Huelgas por parte de los sindicatos por sobreexplotación.

Para evitar este fenómeno es necesario buscar alternativas que incentiven el uso de la metodología por parte de todos los trabajadores, para que ambas partes tanto empleador como empleado se vean beneficiados con el aumento de la productividad. Una herramienta para esto utilizada hoy en día podría ser la remuneración por metas en vez de un salario fijo.

Bibliografía

1. ALEXANDRA B. TENERA. Critical Chain Buffer Sizing: A comparative Study. University Nova of Lisboa. 2008.
2. ANDERS LUNDIN. Critical Chain Project Management – CCPM. Velocity Management Group. 2008.
3. C. NORTHCOTE PARKINSON. La Ley de Parkinson. 1957.
4. CÁMARA ARGENTINA DE LA CONSTRUCCIÓN. Gestión de Proyectos por Cadena Crítica. 2012.
5. CÁMARA ARGENTINA DE LA CONSTRUCCIÓN. Gestión de Proyectos por Cadena Crítica. 2013.
6. ELIYAHU M. GOLDRATT. The Goal. 1984.
7. ELIYAHU M. GOLDRATT. Critical Chain. 1997.
8. ELIYAHU M. GOLDRATT. What is This Thing Called Theory of Constraints?. North River Pr. 1999.
9. HAVEY A. LEVINE. Shared Contingency: Exploring the Critical Chain. PM Network. October 1999.
10. IZACK COHEN, AVISHAI MANDELBAUM, AVRAHAM SHTUB. Multi-Project Scheduling and Control: A Process-Based Comparative Study of the Critical Chain and Some Alternatives. Project Management Journal. June 2004.
11. JEFFREY K. PINTO. Some Constraints on the Theory of Constraints. PM Network. August 1999.

12. KEVIN P. GRANT, PHD, PMP, AND MARTON GERGELY. Critical Chain Project Management: Under Investigation or Case Closed?. PMI. 2012.
13. LAWRENCE P. LEACH. Critical Chain Project Management, Second Edition. Artech House, INC. Second Edition. 2004.
14. LAWRENCE P. LEACH. Critical Chain Project Management Improves Project Performance. Project Management Journal. June 1999.
15. M. DACHYAR, UTOMO DHANY SAPUTRA. Comparison between Critical Chain and Critical Path method in telecommunication Tower construction Project Management. Proceeding of the 11th International Conference on QiR (Quality in Research). 2009.
16. M^a CARMEN GONZÁLEZ-CRUZ, SABINA ASENSIO-CUESTA, JOSE ANTONIO DIEGO-MÁS, JORGE ALCAIDE-MARZAL. Análisis del método de la cadena crítica vs el método del camino crítico. Viabilidad y Conceptos. XIII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA DE PROYECTOS, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2009.
17. OYA TUKEL AND WALTER ROM. Analysis of Resource Buffer Management in Critical Chain Scheduling. PMI. 2006.
18. PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, INC. Guía de los FUNDAMENTOS PARA LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS (GUÍA DEL PMBOK). PMI. Cuarta Edición. Capítulo 6. 2012.
19. PROJECT MANAGEMENT JOURNAL, PETER BERNDT DE SOUZA MELLO Y JEFFERSON GUIMARÃES. The Application of SDPM, Critical Chain and Portfolio Project Management Principles to the Construction of the 670 km Urcu/Manaus. PMI Global Congress Proceedings. 2008.
20. R.C.D. PHILLI AND H. GUMEDE. A case study on stoping shift buffering at Impala Platinum: A critical chain project management perspective. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Volumen 111. 2011.

21. RUSSELL D. ARCHIBALD. The history of modern project Management. Project Management Journal. Volumen 111. September 1987.
22. TAMMO T. WILKENS, PMP. Critical Path or Chain or Both?. PM Network. 2000.
23. UMESH DWIVEDI, PMP. Critical Path Method and Critical Chain Project Management. 2008.
24. WILLY HERROELEN, ROEL LEUS, ERIK DEMEULEMEESTER. Critical Chain Project Scheduling Do Not Oversimplify. Project Management Journal. December 2002.