



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Organización

**Gestión de Proyectos mediante cadena crítica
(CCPM Critical Chain Project Management)**

Autor:

Sáez Marcos, Celia

Tutores:

Poza García, David Jesús

Acebes Senovilla, Fernando

**Dpto. Organización de Empresas y
Comercialización e Investigación de Mercados**

Valladolid, junio 2021.

RESUMEN

Una de las dimensiones de la Dirección del Proyectos consiste en asegurar la finalización del proyecto en el tiempo previsto. Muchos de los problemas relacionados con los retrasos en la finalización de los proyectos se deben a la incertidumbre agregada por su entorno. En este contexto, la metodología CCPM "*Critical Chain Project Management*" nos facilita la elaboración de una programación que tenga en cuenta esta incertidumbre con el objetivo de aumentar la probabilidad de que el proyecto cumpla con la fecha de finalización prevista.

La metodología CCPM aborda la problemática generada por la incertidumbre recurriendo a la introducción de buffers, colchones de tiempo ubicados a lo largo del proyecto. Estos son definidos y dimensionados estratégicamente en base a diferentes fórmulas que veremos a lo largo del TFG. Además, mostraremos un caso práctico en el que se aplican varios criterios de dimensionado de buffers para obtener las diferentes duraciones del proyecto.

Palabras Clave:

CCPM, Cadena Crítica, Goldratt, amortiguador, buffer.

CONTENIDO E ÍNDICES

RESUMEN	3
I. INTRODUCCIÓN	9
1. TÍTULO DEL PROYECTO	9
2. ALCANCE DEL TRABAJO	9
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	10
4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	10
II. MARCO TEÓRICO	13
1. METODOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN DE PROYECTOS	13
1.1 PMI: Project Management Institute	14
1.2 IPMA: International Project Management Association	14
1.3 ISO21500:2012: Orientación sobre la gestión de proyectos	14
1.4 PM ² : Project Management Methodology	15
1.5 APM: Association for Project Management	15
2. RESTRICCIONES	16
3. PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS	17
3.1 Métodos para la creación del cronograma teniendo en cuenta únicamente las relaciones de precedencia	20
3.1.1 GANTT	20
3.1.2 CPM	21
3.1.3 PERT	23
3.1.4 ROY	24
3.2 Métodos para la creación del cronograma teniendo en cuenta los recursos del proyecto	25
III. EL MÉTODO CCPM	29
1. IDENTIFICACIÓN DE LIMITACIONES	30
2. BASES	32
2.1 Teoría de las Restricciones	33
2.1.1 Método DBR (Drum Buffer Rope)	34
a. Drum (Tambor)	34
b. Buffer (Amortiguador)	34
c. Rope (Soga)	35
2.2 TQM (Total Quality Management)	36
2.3 PMBOK	36
3. ORÍGENES DE LOS RETRASOS	37
3.1 Síndrome del Estudiante	38
3.2 Ley de Parkinson	38
3.3 Ley de Murphy	38
4. BUFFERS	39
4.1 Tipos de buffers	39
4.1.1 Buffers de proyecto	39
4.1.2 Buffers de alimentación	41
4.1.3 Buffers de recurso	43
4.2 Métodos de dimensionado de buffer	44
4.2.1 La Regla del 50% (Cut and Paste Method – C&PM)	44
4.2.2 Método del tercio crítico	46



4.2.3	Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (Square Root of the Sum of the Squares - SSQ)	46
4.2.4	Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error	47
4.2.5	Procedimientos adaptativos de dimensionado del buffer: APD y APRT	48
-	Procedimiento adaptativo con densidad (Adaptative Procedure with Density – APD).....	48
-	Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (Adaptative Procedure with Resource Tightness – APRT)	49
IV.	CASO PRÁCTICO.....	51
1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	51
2.	CRONOGRAMAS DE REFERENCIA	53
3.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA CCPM. DIMENSIONADO DE BUFFERS.	57
3.1	La Regla del 50% (Cut and Paste Method – C&PM).....	58
3.2	Método del tercio crítico	61
3.3	Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (Square Root of the Sum of the Squares - SSQ)	62
3.4	Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error	64
3.5	Procedimientos adaptativos de dimensionado del buffer: APD y APRT.....	66
-	Procedimiento adaptativo con densidad (Adaptative Procedure with Density – APD).....	66
-	Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (Adaptative Procedure with Resource Tightness – APRT)	69
4.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. ANÁLISIS DE LA CADENA CRÍTICA	75
V.	CONCLUSIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA	81



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Restricciones de un proyecto . Fuente: elaboración propia	16
Ilustración 2- Ejemplo dependencia Final- Inicio. Fuente: Elaboración propia.....	18
Ilustración 3- Ejemplo dependencia Final-Final. Fuente: Elaboración propia.....	18
Ilustración 4- Ejemplo dependencia Inicio - Inicio. Fuente: Elaboración propia.....	18
Ilustración 5 – Ejemplo dependencia Inicio - Final. Fuente: Elaboración propia	18
Ilustración 6 - Holguras dentro de un proyecto. Fuente: Elaboración propia	19
Ilustración 7- Ejemplo gráfico diagrama de GANTT [19].....	20
Ilustración 8 - Notación para cálculo de indicadores.	21
Ilustración 9 - Diagrama CPM con cálculo de fechas y holguras. [13]	22
Ilustración 10 – Eje cronológico de desarrollo de metodologías de programación de proyectos.	27
Ilustración 11 - Comparación cronograma convencional con cronograma CCPM haciendo uso de un buffer de proyecto	30
Ilustración 12- Representación de la Cadena Crítica CCPM [32].	33
Ilustración 13 - Diagrama ilustrativo metodología DBR [41].....	35
Ilustración 14 - Los 5 grupos de procesos e intensidad de uso a lo largo del proyecto [14].	37
Ilustración 15 - Trabajo invertido en una tarea a lo largo del tiempo comparado con su estimación [46].....	38
Ilustración 16- Diagrama Ilustrativo buffer de proyecto. Fuente: Elaboración propia	41
Ilustración 17- Diagrama Ilustrativo1 buffer de alimentación. Fuente: Elaboración propia	42
Ilustración 18- Diagrama Ilustrativo buffer de alimentación. Fuente: Elaboración propia	42
Ilustración 19- Diagrama buffer de alimentación y de proyecto. ‘BA’ representa el buffer de alimentación de cada cadena. Fuente: Elaboración propia	43
Ilustración 20 - Representación del diagrama Gantt del proyecto cuando las actividades se programan teniendo en cuenta su duración probable según los expertos	55
Ilustración 21- Representación del diagrama Gantt del proyecto cuando las actividades se programan teniendo en cuenta su duración optimista según los expertos	56
Ilustración 22 – Duración del diagrama de referencia con márgenes implícitos.....	57
Ilustración 23 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Regla del 50%) con camino crítico en rojo.	60
Ilustración 24 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando C&PM.60	
Ilustración 25- Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Método Tercio Crítico) con camino crítico en rojo.	61
Ilustración 26 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el método del Tercio Crítico.....	62
Ilustración 27 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Método Raíz Cuadrada de Suma de Cuadrados) con camino crítico en rojo.	63
Ilustración 28 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SSQ).	63



Ilustración 29 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Método basado en Raíz Cuadrada del Error) con camino crítico en rojo.....	65
Ilustración 30 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el Método basado en la Raíz Cuadrada del Error.....	66
Ilustración 31 - Diagrama de Gantt del proyecto mostrando relaciones de precedencia.....	67
Ilustración 32 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (APD) con camino crítico en rojo.....	69
Ilustración 33 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el Procedimiento adaptativo con densidad (APD).....	69
Ilustración 34 - Asignación de recursos del proyecto.....	70
Ilustración 35 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (APRT) con camino crítico en rojo.....	74
Ilustración 36 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el Procedimiento adaptativo con escasez de Recursos (APRT).....	75
Ilustración 37 - Comparación de las duraciones haciendo uso de las diferentes metodologías de dimensionado de buffer.....	77



I. INTRODUCCIÓN

1. Título del proyecto

“Gestión de Proyectos mediante cadena crítica (CCPM Critical Chain Project Management)”

2. Alcance del Trabajo

La Dirección de Proyectos se encarga de que un proyecto cumpla con el trabajo definido, en el tiempo establecido, siguiendo el presupuesto previsto y manteniendo las expectativas y calidad esperadas. Asimismo, planifica, programa y controla las actividades a realizar durante el proyecto y nos ofrece las metodologías necesarias para resolver los problemas relativos a las duraciones de los proyectos con el fin de proporcionar beneficios a la organización y asegurar el éxito del proyecto.

La gran mayoría de los problemas relativos a los retrasos en las fechas de finalización de los proyectos se deben a la incertidumbre agregada por su entorno. La metodología CCPM “Critical Chain Project Management” nos facilita la elaboración de un plan de trabajo (programación de proyecto) teniendo en cuenta esta incertidumbre y nos permite llegar a una aproximación más real a la fecha de culminación del proyecto.

CCPM añade buffers con el fin de resolver la problemática generada por la incertidumbre. Los buffers son colchones de tiempo que se añaden a lo largo del proyecto con el objetivo de asegurar que la ejecución del proyecto se dé en el plazo establecido. Estos buffers son los encargados de absorber las desviaciones que, debido a la procrastinación de los recursos (síndrome del estudiante), a la expansión del trabajo a lo largo de todo el tiempo disponible (Ley de Parkinson) o incluso a la aparición de aspectos no previstos a lo largo del desarrollo del proyecto (Ley de Murphy) pueden aparecer en el proyecto. El concepto principal de esta metodología se centra en adaptar los tiempos que los recursos poseen para desarrollar cada una de las actividades del proyecto en cuestión. En un primer instante, los recursos nos informan de lo que tardarán en ejecutar cada una de las actividades del proyecto en cuestión y posteriormente, el director del proyecto ajustará estas duraciones de forma que los recursos funcionen de una forma más intensa y ágil para poder evitar la aparición de las desviaciones anteriormente expuestas. Los recursos que participan en cada actividad no tienen conocimientos de la existencia de este buffer de proyecto debido a que si lo conocieran, existiría la posibilidad de que la procrastinación de recursos volviera a aparecer. El tamaño de este buffer de proyecto será calculado según las distintas aproximaciones que se describen a lo largo de este TFG.

Además de la descripción teórica de la metodología CCPM, de entre los distintos tipos de buffers que propone, **este TFG se enfocará en el buffer de proyecto**, es decir, en el buffer que se añade al final de la programación del proyecto para poder absorber los posibles



retrasos en la duración de las actividades críticas del proyecto. Para ilustrar el procedimiento de dimensionado del buffer de proyecto, mostraremos un caso práctico en el que aplicaremos los métodos de dimensionado de buffers de proyecto más habituales.

3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto será el llegar a conocer la utilidad de la metodología de la de la Cadena Crítica en la Programación de Proyectos (CCPM) y los beneficios que nos proporciona a la hora de establecer la duración del proyecto siempre teniendo en cuenta la incertidumbre generada por el entorno. Metodología que estudiaremos, entenderemos, analizaremos y aplicaremos. Esto mismo haremos con los principales tipos de buffer existentes, centrándonos únicamente en los métodos de dimensionamiento de buffers de proyecto estudiando la utilidad de cada uno de ellos y la conveniencia de utilizar uno u otro.

4. Estructura del documento

La memoria del trabajo se divide en cinco capítulos:

Introducción

Es el presente capítulo. Se explica el contexto en el que se encuentra este trabajo y los objetivos marcados.

Marco teórico

En este capítulo se expone la contextualización del trabajo así como una explicación de la temática principal. Se exponen asimismo los conceptos de gestión, planificación, y programación de proyectos.

Desarrollo del trabajo

Este capítulo explica detalladamente el proceso de identificación de las limitaciones en proyectos y las bases de esta metodología. Se identificarán también los orígenes de los retrasos en el desarrollo de los proyectos. Es decir, se hará un estudio de los factores que influyen en la necesidad de la aplicación de la metodología CCPM y su funcionamiento.

Por otro lado, se dedicará un subapartado a los buffers en el que se expondrán los principales tipos de buffers y los diferentes métodos de dimensionamiento de buffer de proyecto existentes.

Caso práctico

En este capítulo aplicaremos esta metodología a un proyecto real desarrollado a lo largo de mi periodo de prácticas de empresa. En este proyecto calcularemos la duración del proyecto haciendo uso de los diferentes métodos de dimensionamiento de buffer de



proyecto y los compararemos entre ellos para mostrar cual será el adecuado para cada caso.

Conclusiones

Por último, se realizarán algunos comentarios finales acerca del trabajo indicando las aportaciones, las utilidades y las líneas futuras a seguir.



Universidad de Valladolid

Gestión de Proyectos mediante cadena crítica (CCPM Critical Chain Project Management)



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



II. MARCO TEÓRICO

Los proyectos siempre han formado parte de nuestra sociedad en mayor o menor medida, dado que son un factor imprescindible para llevar a cabo las actividades cotidianas de manera organizada y eficiente. Un proyecto (del latín *proiectus*) es definido por el *Project Management Institute* (PMI) como “*un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único*” [1], una definición muy similar viene expuesta en el *Individual Competence Baseline* (ICB) que se refiere a ello como “*Un esfuerzo temporal, único, multidisciplinar y organizado que se lleva a cabo entregables sujetos a requisitos y restricciones predefinidos*” [2]. Ambas acepciones son coincidentes en los aspectos relacionados con la temporalidad y la unicidad del resultado que se obtiene.

El 74% de los proyectos no son exitosos. Esto se debe a que la dirección del proyecto ha fallado en alguno de los aspectos a considerar antes de la ejecución del mismo. La dirección de proyectos es la encargada de hacer que un proyecto cumpla con el trabajo definido, finalice en el tiempo establecido, bajo el presupuesto calculado y manteniendo las expectativas y calidad esperadas [3].

La dirección del proyecto es la encargada de aplicar los conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades para cumplir los requerimientos del mismo [1]. El cumplimiento de los mismos da una elevada probabilidad de éxito en el proyecto. Por otro lado, definir de forma precisa el alcance del proyecto nos puede solucionar muchos problemas durante la ejecución y ayudarnos a alcanzar más fácilmente los objetivos. A lo largo de la planificación del proyecto deben establecer los criterios que se han de tener en cuenta para llevar el proyecto al éxito.

Mantener el camino hacia el éxito no es una tarea fácil, para ello, además de cumplir con los plazos, los presupuestos y el alcance se deberá unir a los clientes y a los equipos para que todos ellos tengan una misma visión de lo que es necesario para completar el proyecto con éxito. La gestión de proyectos será la encargada de ofrecernos las metodologías necesarias para superar los problemas que se ocasionen y llegar a la solución, producto o servicio [4].

1. Metodologías para la gestión de proyectos

La gestión de proyectos es el proceso que nos permite planificar, programar y controlar las actividades que se han de realizar durante el proyecto para alcanzar los objetivos definidos [4] y así, proporcionar un beneficio a la organización. Estos objetivos vendrán expresados en forma de resultados, consecuencias, beneficios o nuevos objetivos [5].

Existen diferentes metodologías consolidadas en la gestión de proyectos.



1.1 PMI: *Project Management Institute*

Nacido en Estados Unidos en el año 1969 como una organización profesional sin ánimo de lucro con el fin de proporcionar un avance de la gestión, la administración y la dirección de proyectos. Su inicio oficial se dio tras la publicación de artículos pertenecientes al PMI en la ciudad de Philadelphia (Pensilvania, E.E.U.U.).

A principios del 1990 el PMI publicó la primera edición de la Guía del PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*), considerada una de las herramientas fundamentales para la gestión y dirección de proyectos. El PMI organiza los proyectos en función de los procesos que forman parte de él [6].

1.2 IPMA: *International Project Management Association*

Primera asociación de administración de proyectos del mundo originada en 1965 en Viena (Austria) por un grupo en forma de foro de *project managers* para generar redes de trabajo y compartir información.

Desde sus inicios ha buscado promover la administración de proyectos y dirigir el desarrollo de la profesión a través de competencias y conocimiento dentro de un determinado contexto. A día de hoy, IPMA es una Confederación que cuenta con más de 50 Asociaciones Nacionales de Gestión de Proyectos y cuentan con cuatro niveles de certificación [6].

La metodología de certificación de cuatro niveles se verá reflejada en el estándar de IPMA: el ICB (*IPMA Competence Baseline*). El objetivo principal del ICB es estandarizar y reducir las tareas básicas necesarias para completar un proyecto de la forma más efectiva y eficiente basándose en las competencias [7]. Diferencia entre 3 tipos distintos de competencias: perspectiva, personas y práctica. Se deberá tener un cierto grado de conocimiento de cada una de ellas, saber cuándo han de utilizarse y poder ponerlas en práctica para llevar a cabo una correcta toma de decisiones y gestión del proyecto [3].

1.3 ISO21500:2012: *Orientación sobre la gestión de proyectos*

Esta Norma Internacional proporciona orientación sobre los conceptos y los procesos relacionados con la gestión de proyectos, que puede ser utilizado por todo tipo de organizaciones independientemente de la complejidad, tamaño o duración del proyecto [8].

UNE-ISO 21500 busca identificar y ordenar las tareas dentro del proyecto proporcionando descripciones muy desarrolladas de cada uno de los conceptos y procesos que son considerados buenas prácticas, reconocidas de forma generalizada, a lo largo de la realización proyecto. Es decir, busca que el resultado obtenido tras la realización de un proceso sea el mismo indiferentemente de quien



haya llevado a cabo su desarrollo, esto se consigue a través de un proceso de homogeneización de las actividades [5].

Esta norma nos proporciona beneficios como la mejora de ejecución de proyectos a través de la transferencia de conocimientos entre proyectos y organizaciones, y la mejora de la eficacia de los procesos de licitación ya que utiliza una terminología común para la gestión de proyectos [8].

Esta nueva norma, no es certificable, aunque está en fase de estudio por el Comité ISO/TC258 la posibilidad de que más adelante lo llegue a ser.

1.4 PM²: *Project Management Methodology*

PM² es una metodología de gestión de proyectos que tiene como objetivo permitir que los directores de proyecto den soluciones y ventajas a sus organizaciones haciendo uso de una gestión eficiente del trabajo a lo largo del desarrollo de un proyecto. Esta metodología fue desarrollada y respaldada por la Comisión Europea.

Los equipos de proyectos lo ven como una metodología fácil de acomodar a sus necesidades gracias a su sencillez y su facilidad de implantación. Su finalidad principal es llegar a satisfacer las necesidades de las instituciones y proyectos de la UE y de las Administraciones Públicas beneficiándose de su gran capacidad de adaptación al entorno.

La facilidad de uso de PM² en cualquier tipo de organización es debido a la incorporación de elementos de una amplia gama de buenas prácticas, normas y metodologías globalmente aceptadas en gestión de proyectos [9].

Su propósito se resume en el eslogan de *“Una Metodología de Dirección de Proyectos común para todas las Instituciones, Estados Miembros, Proveedores y Ciudadanos de la Unión Europea”* [9].

1.5 APM: *Association for Project Management*

Es una Organización Profesional que tiene como objetivo promover las disciplinas de gestión de proyectos y gestión de programas en el Reino Unido, lugar en el que es conocido como el organismo principal de gestión de proyectos.

La Asociación para la Gestión de Proyectos fue fundada en el año 1972 como “la rama británica de INTERNET” es actualmente es conocida como *International Association for Project Management (APM)*. Esta asociación recibió su carácter oficial en 2017.

Este proceso de gestión de proyectos lo desarrolla a través de un programa denominado *“FIVE Dimensions of Professionalism”*. APM ofrece productos y servicios que incluyen membresías registradas y calificaciones, eventos, publicaciones y servicios en línea [10].

2. Restricciones

En todos los proyectos existen limitaciones que han de tenerse en cuenta antes de iniciar un proyecto y estudiarse para garantizar su éxito. Las restricciones son limitaciones que afectan el desarrollo de un proyecto y limitan las opciones del equipo [11].

En el PMBOK [12] se definen las restricciones como “*el estado, calidad o sentido de estar restringido a un determinado curso de acción o inacción. Una restricción o limitación aplicable, sea interna o externa al proyecto, que afectará el desempeño del proyecto o de un proceso*”.

A lo largo de la vida de un proyecto, siempre surgirá la necesidad de llegar a lograr unos objetivos comunes a todos ellos. Para llegar a conseguir estos objetivos aparecerán restricciones que formarán parte de todos los proyectos, las más trascendentes son:

- Alcance
- Plazo
- Coste
- Calidad
- Satisfacción de los interesados (*stakeholders*)

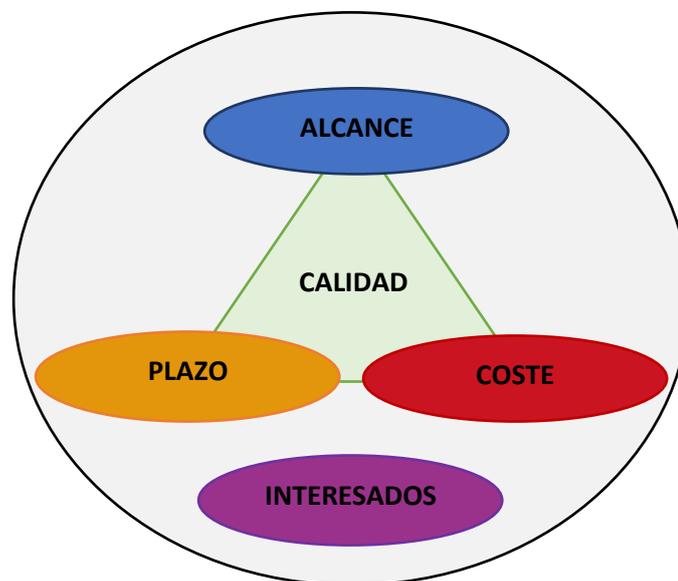


Ilustración 1 - Restricciones de un proyecto . Fuente: elaboración propia

Como podemos observar en la *Ilustración 1*, el Alcance, el Plazo y el Coste forman un triángulo denominado Triángulo de Gestión de Proyectos o Triángulo de Calidad.

El alcance es importante para especificar todas las tareas que se deben realizar a lo largo del desarrollo del proyecto y cómo se llevarán a cabo, es decir, la planificación del proyecto. Una vez definidas las actividades que formarán parte del alcance del proyecto, es necesario



encontrar las fechas en las que esas actividades pueden comenzar en función de distintas restricciones. De estas cuestiones se ocupa la gestión del cronograma del proyecto (en ocasiones denominado también plazo o tiempo - *project scheduling*). El objetivo de la gestión del cronograma es buscar una programación adecuada para cada proyecto fijando unas fechas determinadas de comienzo y/o fin de cada una de las actividades que lo forman. Por otro lado, está el coste, compuesto por un presupuesto establecido en la etapa inicial del proyecto. Tras la realización del cronograma del proyecto se comparará al coste de las actividades con el presupuesto disponible. Las tres restricciones están interconectadas y dependen mucho la una de la otra. Una buena organización de estas asegura que los resultados del proyecto cumplan con los requisitos especificados. De este aspecto se encarga la gestión de la calidad del proyecto.

Estos requisitos se definen para satisfacer las necesidades de los interesados (*stakeholders*). Un *stakeholder* será toda aquella persona que, relacionada con las actividades y decisiones del proyecto, es decir, aquellos que permiten su funcionamiento. La clave para gestionarlos de forma óptima y eficaz está en la calidad, disponibilidad y flujo de la información entre las partes implicadas.

La planificación del proyecto se encargará de definir los objetivos, las actividades necesarias y la forma en la que se desarrollarán. Esto se complementará haciendo uso de la programación del proyecto, que establecerá un calendario de ejecución del proyecto haciendo un cálculo aproximado de la duración de cada una de las actividades y asociándolas un tiempo de inicio y de finalización.

3. Programación de proyectos

La programación de proyectos se encarga de establecer una secuencia lógica y estimar la duración de cada una de las actividades. Haciendo uso de esto, se elabora el cronograma del proyecto, herramienta que nos permitirá ordenar las actividades que lo constituyen, sus duraciones aproximadas y las relaciones de precedencia entre ellas [13].

En un primer lugar, será necesario previamente identificar y documentar las relaciones lógicas para poder realizar una secuenciación de las actividades del proyecto. La definición de estas relaciones lógicas será una tarea muy importante que se ha de realizar detalladamente para poder obtener una duración aproximada del proyecto. En el caso de que estas no se definan correctamente, nos llevará a unas duraciones del proyecto mucho mayores de las realmente esperadas. Para que esto no ocurra, se deberán establecer restricciones de orden en la ejecución de las actividades [14].

Existen 4 tipos de dependencias en función de la relación entre las actividades:

- **Final- Inicio**

La actividad sucesora puede comenzar una vez haya finalizado la actividad predecesora. Es el tipo más común.

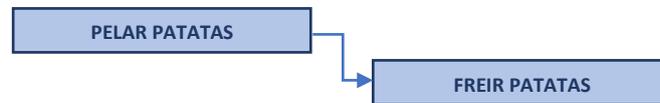


Ilustración 2- Ejemplo dependencia Final- Inicio. Fuente: Elaboración propia

- **Final-Final**

La actividad sucesora puede finalizar una vez haya finalizado la actividad predecesora.

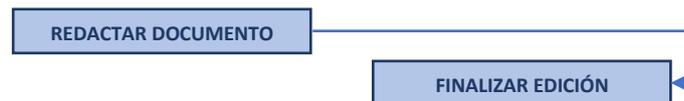


Ilustración 3- Ejemplo dependencia Final-Final. Fuente: Elaboración propia

- **Inicio-Inicio**

La actividad sucesora puede comenzar después de que haya comenzado la predecesora. Relación estratégica de sincronización.

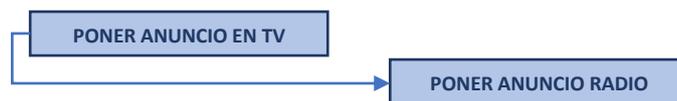


Ilustración 4- Ejemplo dependencia Inicio - Inicio. Fuente: Elaboración propia

- **Inicio - Final**

La actividad sucesora no puede finalizar hasta que comience la actividad predecesora.



Ilustración 5 – Ejemplo dependencia Inicio - Final. Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la ordenación de las actividades se desarrollará el calendario de ejecución de las tareas. Algunas actividades pueden tener cierta holgura. La holgura de una actividad hace referencia al tiempo máximo que tenemos para llevar a cabo una actividad sin que se retrase la fecha de finalización del proyecto. Es decir, el margen que tenemos para llevar a cabo una actividad. Estas holguras se dan de manera aleatoria a lo largo del desarrollo del proyecto y son poco útiles a la hora de limitar los efectos de las variaciones en las duraciones de las actividades [15].

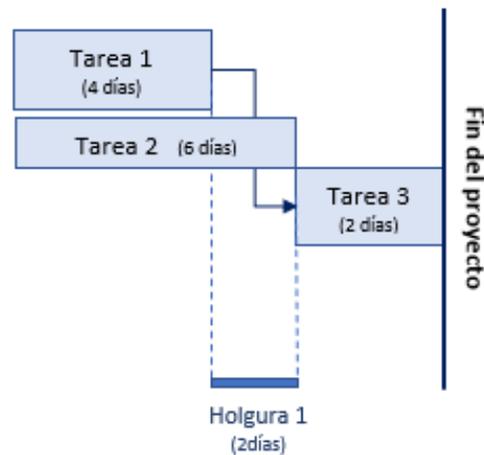


Ilustración 6 - Holguras dentro de un proyecto. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, existen las actividades críticas son aquellas actividades cuya holgura es nula y que, por lo tanto, si se retrasan en su fecha de inicio o se terminan de completar más tarde de lo esperado, provocarán un retraso de esa misma duración, pero en la fecha de finalización del proyecto. Como se puede observar en la *Ilustración 6*, la Tarea 1 tiene una duración de 4 días y una holgura de 2 días, es decir, esta se podrá retrasar hasta un máximo de 2 días en su realización sin afectar a la fecha de fin del proyecto. En cambio, la Tarea 2 tiene una duración de 6 días y, si esta durara más de lo esperado, se produciría un retraso en el comienzo de la Tarea 3, y como resultado, un retraso en la fecha de finalización del proyecto. Las actividades que pueden provocar un retraso en la fecha de finalización del proyecto son las actividades críticas. Las tareas 2 y 3 serán actividades críticas, y formarán la ruta crítica del proyecto.

La dimensión de las holguras es un aspecto muy relevante en la gestión del proyecto. Un cronograma con todas las actividades que forman parte del proyecto nos facilitará el cálculo de las duraciones de estas holguras.

Siempre se ha de tener en cuenta el número de actividades y la cantidad de restricciones de las que esté formado el proyecto, debido a que, si el número es elevado, la complejidad de manejo del cronograma aumentará [16].

Aquellos proyectos en los que la única restricción sean las relaciones de precedencia entre las actividades tendrán una única solución. Por otro lado, aquellos que además de las relaciones de precedencia, tienen en cuenta los recursos con los que consta el proyecto, tendrán infinitas soluciones, por lo que la solución "ideal" será desconocida. Dependiendo de las restricciones que se tienen en cuenta a la hora de programar el proyecto, se utilizarán diferentes métodos para la creación del cronograma.

3.1.2 CPM

El método CPM o Ruta Crítica (*Critical Path Method*) entiende el concepto de proyecto como una secuencia de actividades interrelacionadas entre sí donde cada una de ellas tiene una duración estimada. Este método tiene como objetivo principal determinar la duración de un proyecto [20].

El origen del CPM se dio entre diciembre de 1956 y febrero de 1959 cuando Morgan Walker de Dupont y James E. Kelley de Remington Rand, ingeniero y matemático, consiguieron tener listo este sistema de gestión de tiempos. El objetivo era controlar los tiempos de realización y con ello, los costes implicados en los diferentes proyectos [21].

En esta metodología se considera muy importante la identificación del camino más corto posible para completar el proyecto, este camino será el más largo desde el comienzo hasta el final del proyecto. De este modo, si alguna actividad perteneciente a este camino sufriera un retraso, lo haría también todo el proyecto. Por ello será muy importante identificar las actividades que se han de completar antes de la finalización del proyecto.

En este método, las actividades representan una red de flechas que conectan dos nodos, que serán los eventos temporales. El gráfico constará de un único nodo inicial que representará el inicio del proyecto y un nodo final que representará el evento final. En ocasiones, se deberá recurrir a la creación de actividades ficticias para conseguir representar correctamente la estructura del proyecto, la duración de estas será nula.

A la hora de aplicar la metodología CPM, se presta una especial atención a tres indicadores: las estimaciones de las fechas más tempranas (E_i) y tardías (L_i) de comienzo de cada una de las actividades que forman parte del proyecto y el cálculo de las holguras ($H_{i,j}$) para poder determinar el camino crítico.

Estas fechas vendrán representadas en el diagrama CPM de la siguiente forma.

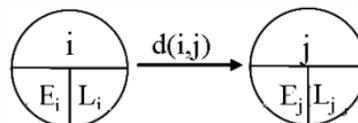


Ilustración 8 - Notación para cálculo de indicadores.

Siendo:

- E_i : fecha más temprana de realización del evento i.
El cálculo de esta fecha se realizará recorriendo la red de izquierda a derecha y haciendo uso de la fórmula:

$$E_i = \max (E_i + d_{i,j})$$



considerando:

- E_i del primer nodo es igual a 0.
- El resto de las fechas más tempranas se calculan siguiendo el orden de numeración de los nodos.

- L_i : fecha más tardía en la que debe haber sucedido el nodo i para que el proyecto no sufra retrasos.

Para calcular este indicador se deberá recorrer la red de derecha a izquierda haciendo uso de la fórmula:

$$E_i = \min (L_j - d_{i,j})$$

considerando:

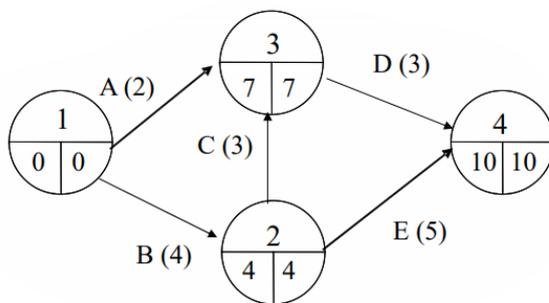
- L_i del primer nodo (desde la derecha) es igual al E_i de este.
- El resto de las fechas más tardías se calculan siguiendo el orden inverso de numeración de los nodos.

- $H_{i,j}$: Tiempo de holgura, es decir el tiempo extra disponible para ejecutar la actividad. Se calculará como la diferencia entre L_i y E_i .

$$H_{i,j} = L_j - E_i - d_{ij} = L_i - E_i$$

Las actividades cuya holgura sea igual a 0 se denominarán actividades críticas y pertenecerán a la ruta crítica. El desarrollo de estas actividades no puede sufrir retrasos respecto al cronograma establecido, ya que retrasaría la fecha de finalización del proyecto.

En la *Ilustración 9* se mostrará un ejemplo de un diagrama CPM reflejándose en el cada uno de los indicadores explicados y los cálculos de las holguras.



$$H_A = L_3 - E_1 - d_{1,3} = 7 - 0 - 2 = 5$$

$$H_B = L_2 - E_1 - d_{1,2} = 4 - 0 - 4 = 0$$

$$H_C = L_3 - E_2 - d_{2,3} = 7 - 4 - 3 = 0$$

$$H_D = L_4 - E_3 - d_{3,4} = 10 - 7 - 3 = 0$$

$$H_E = L_4 - E_2 - d_{2,4} = 10 - 4 - 5 = 1$$

Ilustración 9 - Diagrama CPM con cálculo de fechas y holguras. [13]

A



pesar de que en un diagrama puede existir más de un camino crítico, en este ejemplo contaremos de un único camino crítico. La ruta crítica de nuestro proyecto se compone de las actividades B - C - D y la duración total del proyecto será de 10 días.

Las ventajas de esta metodología son varias. Por un lado, el uso de este sistema nos proporciona una visualización total del proyecto al mismo tiempo que nos ayuda a identificar las tareas críticas. Por otro lado, nos permite realizar ajustes durante el proyecto, es decir, nos da flexibilidad al proyecto. Del mismo modo, también consta de algunas limitaciones. Si el proyecto en cuestión está definido con mucho detalle la realización de un diagrama CPM resultará demasiado complejo y se deberá de hacer uso de otra metodología.

3.1.3 PERT

El origen de la técnica PERT o “*Program Evaluation Review Techniques*” se dio formalmente en enero de 1957, de manera paralela al desarrollo del CPM, pero su origen fue en el ámbito militar. Desarrollado en la Oficina de Proyectos Especiales de la Armada de los EE. UU., al reconocer el almirante W.F. Raborn que era necesaria una planificación integrada y un sistema de control fiable para el programa de misiles balísticos Polaris. Con su apoyo se estableció un equipo de investigación para desarrollar esta metodología [22].

Al igual que el método CPM, PERT es un método de gestión de proyectos basado en redes que muestran el flujo y la secuencia de actividades. La diferencia entre CPM y PERT es que este último se utiliza cuando el tiempo necesario para completar cada una de las actividades es desconocido. Es una metodología de planificación y control de tiempo basada en redes que utiliza un modelo probabilístico.

Utiliza el tiempo como una variable para planificar, organizar, coordinar y controlar actividades inciertas a lo largo del desarrollo de un proyecto [23].

El cálculo PERT admite la asignación de probabilidades con tiempos de finalización de tareas de acuerdo con; Tiempo optimista (T_o), tiempo pesimista (T_p) y tiempo más probable (T_m).

En primer lugar, se establecen los márgenes temporales entre los que se moverá la duración de cada actividad:

- Tiempo mínimo T_o (optimista): Duración de la actividad bajo las condiciones más favorables.
- Tiempo máximo T_p (pesimista): Duración de la actividad bajo las condiciones más desfavorables.
- Tiempo medio T_m (más probable): El valor más probable de la duración de la actividad.

La duración de una actividad se considera una variable aleatoria que se ajusta a una distribución de probabilidad del tipo β (beta).



La esperanza matemática se utiliza como duración en el método PERT.

$$E(d) = \frac{T_o + 4T_m + T_p}{6}$$

La varianza también será útil para evaluar la reducción en la duración del proyecto.

$$Var_i = \left(\frac{T_p - T_o}{6}\right)^2$$

Si las duraciones de las actividades son variables aleatorias, la duración del camino crítico también lo será. Esta duración estará compuesta por la suma de los valores asignados que definen las duraciones de las actividades que componen el camino crítico. Para determinar cuál será la ruta crítica del proyecto se deberá calcular las holguras de cada una de las actividades previamente y aquellas que sean iguales a 0 formarán parte de esta ruta.

La representación de este método se hará utilizando arcos para representar las actividades y nodos para representar las relaciones de precedencia. Todas las redes representadas contarán con un nodo de inicio y un nodo de fin.

3.1.4 ROY

Desarrollado en Francia por un grupo de ingenieros encabezados por Bernard Roy y M. Simmonard entre los años 1958 y 1961. Este método es también conocido como método de los potenciales (MPM).

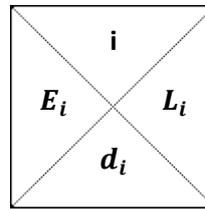
Al igual que los métodos PERT y CPM es una herramienta empleada para desarrollar la programación temporal de proyectos, pero este nos permite realizar los diagramas sin utilizar actividades ficticias (excepto las actividades de inicio y fin) e iniciar los cálculos sin la construcción de la red [24].

El modelo consta de unas reglas de representación de actividades, con sus relaciones y duraciones, basadas en la teoría de grafos, de una metodología de representación de datos, cálculos y resultados y de unas rutinas de cálculo basadas en algoritmos matemáticos de tipo iterativo [25].

La diferencia básica entre el método ROY y los métodos PERT y CPM reside en los principios de construcción del grafo.

- **Nodos:** representan las actividades de las que consta un proyecto y se identifica con un cuadrado.
- **Arcos:** unen los distintos nodos y representan las relaciones de precedencia. De esta forma, se facilitará la representación de las relaciones de precedencia. [14]

Las actividades se representan por cuadros denominados vértices del grafo. Como el que se muestra a continuación:



Siendo:

i: Código de la actividad

E_i : Fecha más temprana de comienzo de la actividad.

L_i : Fecha más tardía de comienzo de la actividad.

d_i : duración de la actividad.

La holgura total de cada actividad se determinará mediante la diferencia entre sus tiempos de comienzo máximo y mínimo. Es decir:

$$H_i = L_i - E_i$$

Por lo tanto, una de las ventajas que presenta este método frente al método PERT es el hecho de que permite realizar todo tipo de relaciones de precedencia facilitando con ello la construcción, modificación e interpretación del grafo [14].

3.2 Métodos para la creación del cronograma teniendo en cuenta los recursos del proyecto

Los recursos son todos aquellos elementos necesarios para poder desarrollar una tarea o proyecto y conseguir los objetivos marcados. Para la ejecución del proyecto hará falta identificar las características de cada uno de los recursos necesarios.

Todas estas actividades de organización y asignación de recursos formaran parte del proceso de “gestión de recursos”. El PMBOK® *Guide* define la gestión de los recursos como “*el grupo de procesos que organizan, gestionan y conducen el equipo del proyecto*” [12].

Para una buena gestión de los recursos se deben identificar y documentar cada uno de los papeles que se desempeñan en el proyecto. Y posteriormente, establecer un calendario de recursos que abarque la disponibilidad, las capacidades y las destrezas de esos recursos [26].

Cuando además de tener en cuenta las relaciones de precedencias de las actividades se consideran también los recursos existentes la obtención de un cronograma para el proyecto se vuelve más compleja. La asignación de recursos a



las actividades del proyecto teniendo en cuenta su fecha de disponibilidad real da lugar a un problema combinatorio conocido como RCPSP.

Este tipo de problemas combinatorios tienen como objetivo encontrar los tiempos de inicio de cada una de las actividades que constituyen un proyecto a través de la asignación de recursos (limitados), con la finalidad de minimizar su tiempo de ejecución total.

La secuenciación de tareas con limitación de recursos (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*) más conocido por sus siglas RCPSP se puede definir formalmente como un modelo de optimización en el que existe una función objetivo y un conjunto de restricciones como las relaciones de precedencia entre actividades y la disponibilidad limitada de recursos [27].

Se han desarrollado diversos algoritmos con el fin de resolver de manera exacta el RCPSP, que tratan de resolverlo haciendo uso de técnicas como la programación lineal entera, programación lineal entera mixta, branch and bound (ramificación y acotamiento), relajación lagrangiana o programación dinámica. Sin embargo, la naturaleza combinatoria de este tipo de problemas hace que sea prácticamente imposible resolverlos en tiempos razonables [28].

Sin embargo, se trata de un problema *NP-hard* [29]. Es decir, no existe resolución de este de manera eficiente en un tiempo razonable debido a la dificultad combinatoria del problema. Por esta razón, se han ido desarrollando diferentes procedimientos que nos permitirán llegar una solución lo suficientemente buena, en lugar de la óptima.

Estos métodos se denominan heurísticos. Son métodos aproximados diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria debido a que nos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos. Entre los métodos heurísticos más conocidos para la búsqueda de soluciones a este problema destacan Búsqueda Tabú, Temple Simulado, Algoritmos Genéticos, Programación Evolutiva, Búsqueda dispersa, Optimización de la Colonia de Hormigas y métodos GRASP [30].

Sea cual sea la herramienta empleada para la construcción del cronograma del proyecto, es decir, teniendo en cuenta únicamente las relaciones de precedencia de las actividades (sección 2.3.1) o bien teniendo en cuenta además la disponibilidad real de recursos (sección 2.3.2), obtendremos una fecha para el comienzo de todas las actividades del proyecto. Puesto que el objetivo de la gestión del cronograma consiste en finalizar el proyecto a tiempo, es habitual que se consideren buffers (margen temporal que se añade a la duración estimada de las actividades dentro del cronograma). La metodología de la Cadena Crítica (CCPM), que trataremos en el siguiente capítulo del TFG, nos ayudará a dimensionar estos buffers en función de las situaciones particulares de las actividades del proyecto.



Gestión de Proyectos mediante cadena crítica (CCPM Critical Chain Project Management)



Ilustración 10 – Eje cronológico de desarrollo de metodologías de programación de proyectos.

En la *Ilustración 10*, se pueden observar la aparición de la metodología CCPM junto con el resto de las metodologías de programación de proyectos que se han presentado en esta sección.



Universidad de Valladolid

**Gestión de Proyectos mediante cadena crítica
(CCPM Critical Chain Project Management)**



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



III. EL MÉTODO CCPM

Critical Chain Project Management (CCPM) es un método introducido por Eliyahu Goldratt en 1997 con el objetivo de superar los obstáculos que le generaban las técnicas de programación tradicional de gestión de proyectos. En este mismo año publicó su libro titulado “*Critical Chain*”, en el que presentó la Teoría de las Restricciones (TOC), utilizado en la técnica CCPM. A través de este libro introdujo un nuevo mecanismo para gestionar las incertidumbres en los proyectos, centrándose en los recursos necesarios para llevar a cabo cada una de las actividades.

Según el PMBOK: “*El método de la Cadena Crítica es una técnica de análisis de la red de programación que modifica el cronograma del proyecto para tener en cuenta los recursos limitados*” [31].

La metodología de la Cadena Crítica (CCPM), tal y como enuncia Dr. Luigi Amendola, consiste en darle mayor énfasis a la culminación a tiempo del proyecto como un todo, prestando menor atención a la finalización de cada una de las tareas por separado [32].

Goldratt observó que con frecuencia los proyectos se alargaban hasta su plazo máximo y esto provocaba un aumento en la probabilidad de sufrir retrasos.

Este método revolucionó el modo de administración y programación de los proyectos, porque supera las limitaciones del método Camino Crítico ya que tiene en cuenta el manejo incorrecto de la incertidumbre, que es la encargada de que la mayoría de los proyectos no se terminen en el tiempo esperado, con el costo esperado y con la calidad deseada.

La cadena crítica se diferencia de la ruta crítica porque incluye dependencias de recursos y nunca cambia. CCPM mejora el plan del proyecto asegurándose de que sea factible e inmune a variaciones de causa común (fluctuaciones estadísticas). Esto lo hace **agregando incertidumbre en amortiguadores (buffers)** al final de las rutas de actividad. Los amortiguadores son actividades ficticias asociadas a tareas reales, con una duración determinada, que se añaden en puntos concretos del cronograma del proyecto para asumir posibles desviaciones temporales en la ejecución.

El uso de estos buffers en la programación de proyectos es muy diferente a la gestión de holguras utilizada en las metodologías anteriormente explicadas (sección II.3.1). La principal diferencia es que las holguras ocurren de forma aleatoria a lo largo del plan del proyecto y generalmente no son útiles para hacer frente a los efectos de las variaciones en las duraciones de las actividades (y del proyecto completo). En cambio, los buffers son capaces de mostrar la incertidumbre en las estimaciones de duración de las tareas [15].

Esta metodología propone tres tipos de amortiguadores según la ubicación de los mismos: el buffer del proyecto, que protege el proyecto ante las diferentes fluctuaciones a lo largo de la cadena crítica, los buffers de alimentación, que se encargan de proteger la cadena crítica de la

fusión de rutas y los buffers de recurso, que se utilizan como señales de advertencia anticipadas para proteger al proyecto ante las variaciones en las actividades no críticas de un recurso cuando la siguiente de este recurso es crítica. La gestión de buffers mejora la medición y la toma de decisiones para el control del proyecto.

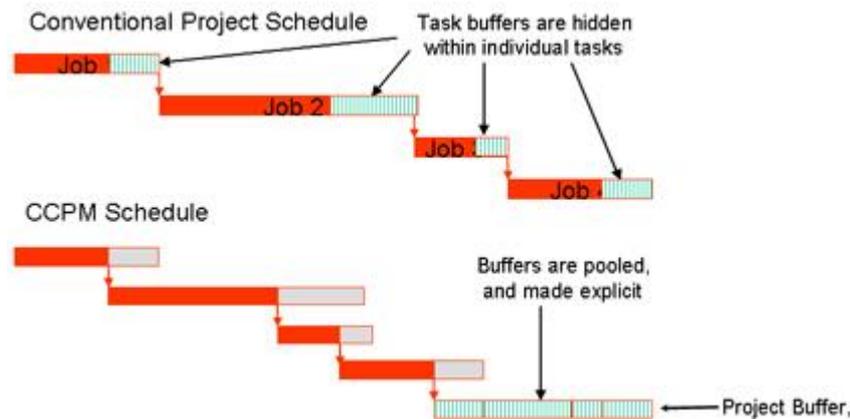


Ilustración 11 - Comparación cronograma convencional con cronograma CCPM haciendo uso de un buffer de proyecto

En la *Ilustración 11* se muestra gráficamente una comparación entre un proyecto programado haciendo uso de buffers implícitos en cada una de las actividades del proyecto y un proyecto programado haciendo uso de la metodología CCPM añadiendo solamente un buffer de proyecto al final de la cadena crítica.

CCPM implementa los cambios necesarios en el comportamiento de los recursos, incluida la eliminación del rendimiento de la actividad basada en la fecha y la multitarea. Los proyectos que utilizan CCPM tienen un historial mucho mejor de rendimiento de programación, costo y alcance.

1. Identificación de limitaciones

El método CCPM define el plazo mínimo en que un proyecto puede terminarse e impone las restricciones (limitaciones), también denominadas cuellos de botella, que logran mantener la alineación con la secuencia de actividades de menor duración. Gracias a esta alineación se combaten los obstáculos que suelen conducir el proyecto al fracaso.

La identificación de estas limitaciones es muy importante para el cálculo de la duración del proyecto. Esta técnica permite identificar las restricciones del proyecto a partir de 5 pasos [33]:

1. Identificar restricciones

Para saber qué elemento es el que provoca el conflicto se debe elaborar una lista al interior de la organización de los posibles factores restrictivos, los posibles cuellos de botella, estos podrán ser desde una máquina que se estropea o se utiliza con mucha



frecuencia, una persona con demasiada carga de trabajo o incluso un departamento de ventas que no cumple con los objetivos de ventas.

Como lo señala la empresa Estrategia Focalizada: *“para identificar los recursos internos como restricción, lo único que tenemos que hacer es calcular un perfil de recursos, en un horizonte dado, y elegir al recurso que tiene la mayor carga”* [34].

2. Explotar la restricción

Se deben considerar las medidas que permitan explotar esta restricción y así llegar a eliminarla, considerando que no siempre será necesario realizar inversiones económicas para solucionar el problema. Por ello, es muy importante identificar el orden de ejecución de las actividades y así poder ver cuáles pueden llevarse a cabo de forma paralela y cuáles dependen de que se complete una actividad previa.

En este punto hay que elegir el mecanismo o la forma más idónea de lograr efectivizar el uso de sus recursos sin que la producción se detenga. En algunos casos, el sistema no es capaz de fabricar todos los productos demandados, por lo que habrá que elegir los que mayor beneficio aportan a la empresa.

3. Subordinar la restricción.

Una vez identificada la restricción, debemos convertirla en el centro de producción, en el tambor (*drum*) para que el resto de actividades de la cadena trabajen al mismo ritmo que este, garantizando que el proyecto no se detenga.

Para convertirlo en el centro de producción haremos uso del buffer de alimentación, que se instalarán al final de todos los caminos o cadenas de actividades, ya sean críticas o no, que deriven de la cadena crítica. Estos buffers en vez de crear una cantidad adicional de material para evitar el desfase del cuello de botella hacen llegar con antelación material a los puntos críticos. De este modo se consigue proteger el proceso de las interrupciones y asegura que el tambor no se queda sin material [35].

El Buffer, junto con el tiempo de preparación y ejecución de las tareas anteriores al cuello de botella determinan cómo será la cuerda (*Rope*).

Se debe considerar que al rendimiento global del sistema no le sirve de nada que el resto de los recursos busquen alcanzar su máximo rendimiento local. Esto hará que el inventario y los gastos de operación aumenten, pero esto no necesariamente se verá reflejado en un aumento de los beneficios.

4. Elevar las restricciones del sistema.

Una vez sincronizado el funcionamiento del sistema se debe empezar a superar las condiciones impuestas por la restricción [35].

Un aumento en la producción de todo el sistema habrá vendrá de la mano a un aumento de la capacidad del cuello de botella. Para ello, será necesario elevar las



restricciones del sistema, esto se puede llevar a cabo de distintas formas. Una opción será añadir buffers de recurso, que funcionan como ventanas de tiempo que rompen con las limitaciones de recurso. Se podrá también elevar las restricciones adquiriendo sistemas de información que nos muestren lo que realmente está sucediendo en la empresa, mejorando la eficiencia del equipo, subcontratando, trasvasando recursos a otras partes del sistema, adquiriendo nueva maquinaria o incluso efectuando cambios en el modelo organizativo de la empresa.

5. Volver al paso uno.

Todo debe subordinarse al nivel máximo de desempeño de la restricción. Se debe prestar especial atención en no permitir que la inercia de las iteraciones se convierta en restricción.

En caso de no lograr un resultado satisfactorio, o como herramienta de revisión de control, se deberá reiniciar el proceso y volver a analizar todo el sistema de nuevo, ya que la búsqueda de la mejora continua es una de las bases de esta metodología.

Estos pasos permitirán a la organización trabajar en un sistema de mejora continua que nos llevará a alcanzar una lógica operacional basada en la identificación y eliminación de las restricciones utilizando herramientas como mejora de procesos, análisis de costes, programación efectiva de procesos, etc. Esto nos permitirá saber cómo actuar ante determinadas situaciones y poder sacarle un mayor rendimiento global del proyecto.

Al considerar las restricciones, será fundamental tener en cuenta las situaciones internas que afectan la obtención de los objetivos marcados, sin olvidar nunca los elementos externos, de fuera de la empresa. Se han de estudiar la forma de enfrentar aquellas situaciones que se encuentran fuera del alcance de la organización.

2. Bases

El método de la Cadena Crítica es representado como la intersección entre TOC (*Theory of Constraints*) “Teoría de las Restricciones”, TQM (*Total Quality Management*) y “PMBOK” [12]. Este método facilita la elaboración de un plan de trabajo con la menor incertidumbre posible, permitiendo una aproximación más real a la fecha de culminación y adaptando el plan a como en realidad trabajan las personas [33].

Esta intersección se muestra en la siguiente ilustración junto con una breve descripción de las principales tareas que desarrolla cada una de estas herramientas.

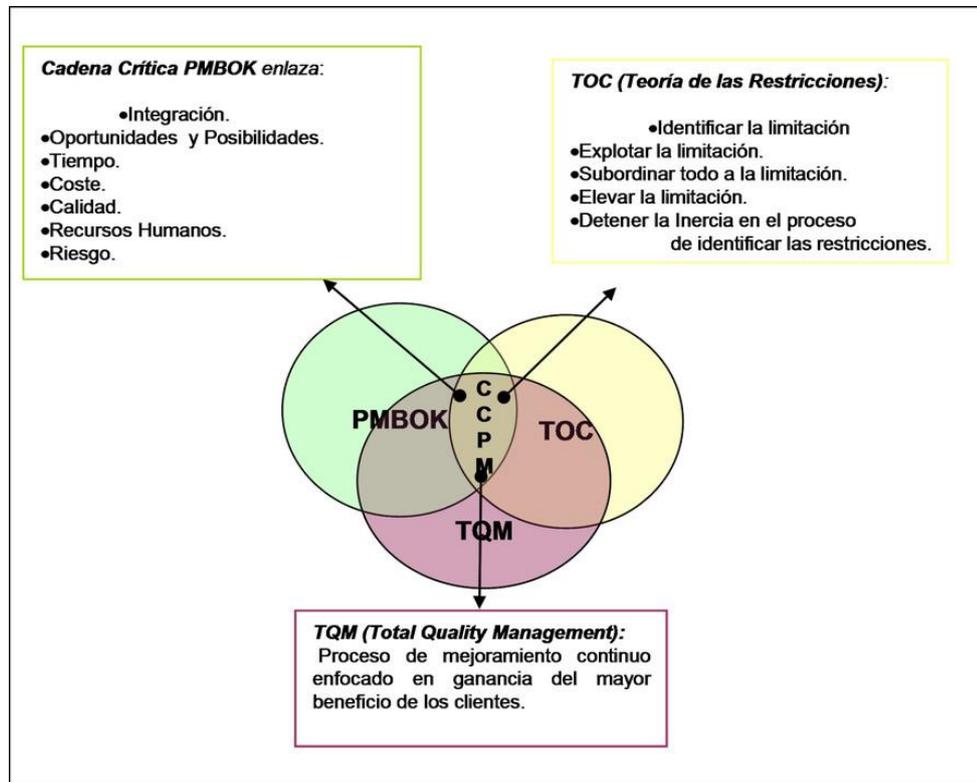


Ilustración 12- Representación de la Cadena Crítica CCPM [32].

2.1 Teoría de las Restricciones

La “Teoría de Restricciones” (“Theory of Constraints”- TOC), fue desarrollada en 1997 en el libro “*Critical Chain*” [36], se define como aquel conjunto de metodologías que nos ofrecen apoyo para identificar las dificultades que nos impiden lograr los objetivos fijados en un sistema. Es decir, se trata de un sistema de mejora continua que se ha de implementar en una organización con problemas de desarrollo o productividad [37].

Anteriormente, se estimaba que solamente el 44% de los proyectos conseguían terminar en el plazo previsto, y un 30% acababan siendo cancelados. Esto se debía a los factores restrictivos [3]. A través de este revolucionario algoritmo de programación, Eliahu M. Goldratt nos dio la oportunidad de incrementar la producción en más de un 40% sin tener que recurrir a nuevos recursos [36].

La aparición de estos factores restrictivos se suele relacionar con la forma de gestionar los tiempos, es decir, con la mala priorización de las tareas, el ansia de “multitarea”, la dependencia entre las actividades, etc.

Eliyahu M. Goldratt describe en su libro que lo que sucede es que “en los primeros dos tercios del periodo asignado para la tarea (los ejecutores) avanzan un tercio del



trabajo, mientras que, en el último tercio, se acelera y se finalizan los dos tercios restantes” [36].

En resumen, el enfoque de la “Teoría de Restricciones” parte de la necesidad de reconocer la causa principal de los problemas para que se pueda llevar a cabo las acciones correctivas necesarias. En la búsqueda para encontrar las causas de los problemas, Goldratt define los factores limitantes como restricciones o “cuellos de botella”. Estos son, como ya explicados anteriormente, los elementos del proceso que suponen un obstáculo que impiden o retrasan la realización de una determinada acción. Estos recursos son los que marcan el ritmo de la producción.

La mejor manera de evitar estos obstáculos que retrasan la ejecución de ciertas actividades será estableciendo una sincronización de la producción de la cadena. El enfoque recomendado por la Teoría de las Restricciones (TOC) para sincronizar la producción es el sistema DBR (*Drum, Buffer, Rope*).

2.1.1 Método DBR (*Drum Buffer Rope*)

El método DBR, conocido en castellano como el método Tambor-Amortiguador-Cuerda, se centra en reconocer los cuellos de botella del proyecto y propone un sistema de producción con el objetivo de reducir el tiempo en la programación de las operaciones y así evitar la transmisión de fluctuaciones en el proceso.

Es considerado un método de planificación, no un método de control que deja espacio para la variación interna y externa de la incertidumbre en el entorno de producción. Este tipo de planificación es incapaz de anticiparse y adaptarse a todos los problemas posibles, que interrumpen el flujo de trabajo durante el proceso pero busca minimizar los retrasos y paradas producidas por el sistema [39].

La analogía era una descripción de una excursión de *boy scouts*. El tambor es el *boy scout* con el ritmo más lento que dicta la velocidad para los demás, el amortiguador y la cuerda son medios adicionales para asegurar que todos los *boy scouts* marchen aproximadamente al ritmo del más lento.

a. Drum (Tambor)

Representa el tiempo de producción dictado por la restricción.

Para evitar que la generación de atascos que perjudican el desarrollo del plan establecido, los demás procesos deben adecuarse a este ritmo. El ritmo dictado por el tambor será el tiempo planificado para tener un aprovechamiento máximo del cuello de botella, por lo que este ritmo no podrá ser alterado.

b. Buffer (Amortiguador)

Cada una de las actividades que forman un proyecto cuentan con sus propios márgenes de tiempo para su desarrollo. Estos márgenes, en ocasiones,

presentan pequeñas variaciones, denominadas también fluctuaciones. Estos pequeños desfases en ocasiones alteran el ritmo (tambor) de desarrollo del proyecto. Para evitar que estos afecten el ritmo determinado por el cuello de botella, se hará uso de buffers o amortiguadores que serán calculados como medidas de tiempo [40].

El objetivo de estos amortiguadores es asegurar el flujo continuo del proceso y la priorización en función del tiempo en que una orden pasa por el cuello de botella, es decir, la restricción de recursos del sistema.

c. Rope (Soga)

Este término vendrá explicado a través de un ejemplo para facilitar su entendimiento:

Cuando un grupo de alpinistas escala una montaña es habitual ver que hacen uso de sogas para asegurar que todos vayan a un mismo ritmo.

En los procesos de producción se utiliza este mismo concepto. La cuerda representará el programa de liberación de materiales, la velocidad con la que los materiales son liberados, también llamado inicio de operaciones. La velocidad debe alinearse con el ritmo de los procesos, determinado por el proceso-restricción [40].

En otras palabras, es un enlace que se encarga de que la restricción esté siempre alimentada con la cantidad justa de trabajo [40].

Estas limitaciones se han de convertir en el foco principal de atención a lo largo del desarrollo del proyecto. En la *Ilustración 13* se muestra este enfoque de una forma gráfica para complementar la anterior explicación.

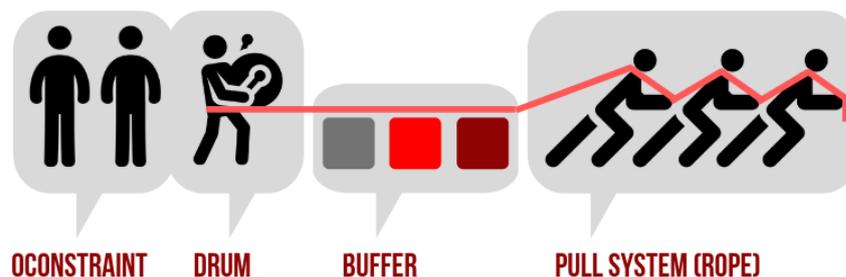


Ilustración 13 - Diagrama ilustrativo metodología DBR [41].

Estos datos se recopilan con la finalidad de planificar el proyecto y controlar todos los recursos de la planta. El resultado de esta sincronización nos proporcionará un flujo continuo de materiales a través de la planta que minimiza la cantidad de interrupciones inesperadas durante el desarrollo del proyecto.



2.2 TQM (Total Quality Management)

La Gestión de la Calidad Total (TQM) enseña que comprender y satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes es lo mejor y lo único que a la larga lleva al éxito en los negocios [42].

Este concepto viene definido en la norma ISO 8402 como: *“El enfoque de gestión de una organización, centrado en la calidad, basado en la participación de todos sus miembros, con el objetivo de lograr el éxito a largo plazo centrándose en satisfacción de los clientes y en los beneficios para todos los miembros de la organización y para la sociedad”* [43].

Aplicar el concepto de “Calidad Total” a los sistemas de gestión de la empresa consiste en integrarlo en cada uno de los procesos de la organización y siempre tiene como idea final la satisfacción de cliente obteniendo beneficios para todos los miembros de la empresa. Por lo que, no sólo busca fabricar un producto con el fin de venderlo, sino que también tiene en cuenta otros factores como las mejoras en las condiciones de trabajo, en la formación del personal y se aplica tanto al producto como a la organización [44].

La implantación de un sistema TQM ayuda a la organización a conseguir el máximo de eficiencia y flexibilidad en todos sus procesos, enfocándola hacia la obtención de los objetivos a corto y medio plazo.

2.3 PMBOK

La Guía del PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) fue desarrollada a principios del 1990 por el *Project Management Institute* (PMI). Esta guía es considerada una de las herramientas fundamentales para la gestión, administración y dirección de proyectos [45]. Se encarga de la organización de los proyectos en función de los procesos que forman parte de él.

Esta guía establece un criterio de buenas prácticas que permite identificar un conjunto de 49 procesos distribuidos en 10 áreas de conocimiento y esto a su vez, en 5 grupos de procesos. Todos los procesos estarán interrelacionados y detallados con entradas, herramientas y salidas para facilitar su ejecución [18].

El PMBOK nos ayuda a crear un plan de proyecto, es decir, documentar todas las acciones necesarias para definir, preparar, integrar y coordinar todos los planes que formaran parte este. Todas estas acciones se definirán haciendo uso de la gestión de la integración, que a su vez, dará pie a diferentes áreas de conocimiento. Las 10 áreas de conocimiento según el PMBOK 6 son las siguientes:

1. Gestión de la integración.
2. Gestión del alcance
3. Gestión del cronograma.
4. Gestión de los costos.
5. Gestión de la calidad.

6. Gestión de los recursos.
7. Gestión de las comunicaciones
8. Área de gestión de riesgos.
9. Gestión de las adquisiciones.
10. Gestión de los interesados.

Los 5 grupos de procesos agrupan las etapas por las que pasa el proyecto a lo largo del tiempo. La evolución del ciclo de vida, con su respectivo nivel de actividad a lo largo del proyecto viene reflejado en la *Ilustración 14*.

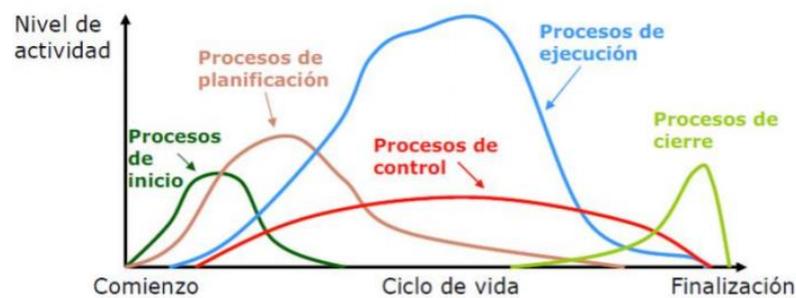


Ilustración 14 - Los 5 grupos de procesos e intensidad de uso a lo largo del proyecto [14].

Los 5 grupos de procesos que intervienen en cualquier proyecto son:

- **Inicio:** Definir un nuevo proyecto o una nueva fase de ejecución del mismo, y obtener la autorización necesaria para llevarlo a cabo.
- **Planificación:** Concretar y establecer objetivos, diseñar las estrategias más adecuadas.
- **Ejecución:** Desempeñar las actividades definidas para conseguir los fines establecidos.
- **Control y monitorización:** Supervisar y evaluar el desempeño del proyecto.
- **Cierre:** Cerrar del proyecto en su totalidad o alguna fase del mismo refiriendo el grado de aceptación y la satisfacción con el resultado obtenido.

En resumen, el PMBOK no es un tratado sobre cómo debe gestionarse un proyecto, sino una manera de interpretar un proyecto en general, identificando los procesos y las posibles áreas de conocimiento que integrarían su gestión.

3. Orígenes de los retrasos

Goldratt descubrió que resulta bastante habitual que los proyectos se alarguen hasta su plazo máximo. Esto provoca que se sufran retrasos ocasionados por circunstancias cuyo origen está fuera del control del director del proyecto.

Observando los patrones que se repiten, llegó a la conclusión de que el origen de los retrasos en cualquier proyecto puede provenir de diferentes lugares. A continuación, se expondrán los orígenes de los retrasos más habituales.

3.1 Síndrome del Estudiante

Viene nombrado por el comportamiento observado en los estudiantes cuando preparan un examen. Este concepto fue introducido por Goldratt en su libro *“Critical Chain”* [31] y se define como el *“fenómeno a través del cual las personas comienzan a dedicarse seriamente a la actividad o tarea que se les ha asignado, solamente cuando la fecha de entrega se acerca”*. De esta forma se realiza un tercio del trabajo durante los dos primeros tercios del tiempo asignado, acelerando y finalizando los dos tercios restantes en el último tercio disponible. Esto se puede observar en la *Ilustración 15*.



Ilustración 15 - Trabajo invertido en una tarea a lo largo del tiempo comparado con su estimación [46].

Es decir, cuanto más tiempo posee una persona siente que tiene para llevar a cabo una actividad, otras actividades pasan a tomar una importancia mayor que la propia tarea en curso.

3.2 Ley de Parkinson

La Ley de Parkinson fue introducida por Cyril Northcote Parkinson en 1957 y en esta enuncia que el trabajo se expandirá hasta llegar a completar todo el tiempo disponible para que se termine.

Aplicando esto en términos de gestión de proyectos se expresará de la siguiente forma: *“cuanto más tiempo se disponga para la realización de una tarea, más tiempo se tardará en completarla, ya que la duración de cada una de las actividades de un proyecto será estimada, ocupando todo el espacio disponible para su realización, incluido el tiempo de protección”* [46].

3.3 Ley de Murphy

Como enuncia la Ley de Murphy *“si algo puede salir mal, saldrá mal”*.

En el momento que la persona encargada de la ejecución de una tarea se pone a trabajar, durante la ejecución descubrirá aspectos que no estaban previstos



anteriormente [47]. Esto tendrá efecto en la fecha real de fin de la tarea, debido a que provocará un retraso respecto de la programada.

Murphy aparece en nuestro proyecto en numerosos aspectos, sin embargo, si se comienza a trabajar en momentos cercanos a la fecha de finalización de la actividad, no se dispondrá del tiempo necesario para poder gestionar los problemas que puedan originarse de forma inesperada.

Todas estas circunstancias tienen graves consecuencias para un proyecto y dificultan su gestión ya que son la principal causa de los retrasos e implican un coste adicional y un aumento del uso de recursos disponibles. En ocasiones, pueden afectar al curso de otras actividades dentro de la planificación, sobre todo cuando existen relaciones de dependencia entre ellas.

El método de la cadena crítica tiene como objetivo dar una solución a estos problemas, definiendo un plazo mínimo en el que se desarrollara cada una de las actividades forzando a los recursos a trabajar de una forma más intensa en un periodo de tiempo mucho más ajustado para terminar la actividad del que ellos habían dicho que necesitaban. De este modo, se liberan todos aquellos márgenes implícitos que ellos añadían a la duración realmente necesaria para completar la actividad. De esta forma se consiguen superar los obstáculos más comunes que pueden acabar llevando un proyecto al fracaso.

4. Buffers

Es difícil conocer a priori los problemas que se van a presentar en la realización de una determinada tarea y en el proyecto como conjunto, la causa principal del desconocimiento de estos problemas se debe a actividades como interacciones con otros proyectos, personal, impacto de factores externos en la organización, etc.

Para minimizar el impacto de este tipo de actividades dentro de la duración del proyecto, se recurrirá a los “buffers”. Son amortiguadores temporales que se insertan en puntos concretos del cronograma del proyecto con una duración determinada, que actúan como actividades ficticias que se consumen automáticamente cuando ciertas actividades requieren más tiempo del previsto, de manera que absorben los retrasos sin afectar a la fecha de terminación del proyecto programada.

4.1 Tipos de buffers

La metodología CCPM propone tres tipos de buffers según la ubicación de los mismos dentro del método de la cadena crítica.

4.1.1 Buffers de proyecto

La fecha de finalización del proyecto puede ser puesta en peligro cuando existen perturbaciones a lo largo de la cadena crítica. Estas perturbaciones se dan



cuando las duraciones de las tareas del proyecto se estiman teniendo en cuenta el tiempo medio.

El buffer de proyecto tiene como finalidad proteger la fecha de finalización programada ante las diferentes fluctuaciones. El tamaño del buffer deberá tener siempre en cuenta el riesgo que ha ido acumulando a lo largo de la cadena crítica.

Para facilitar la explicación, se argumentará con un ejemplo:

Se establece un proyecto formado por 4 tareas. Lo normal es que cada una de las duraciones estimadas para cada una de las tareas se haya calculado teniendo en cuenta experiencias negativas pasadas, por lo que cada una de ellas tendrá un elevado margen en la fecha de finalización (en algunas ocasiones, de hasta el 200%).

En el caso de que la primera tarea finalizara antes de lo previsto, el paso siguiente no se empezara hasta que llegue la fecha programada de su comienzo, por lo que este adelanto en la fecha de finalización de la primera tarea se acabaría perdiendo. Esto se debe a que en este tipo de procesos los pasos se realizan de forma secuencial. Por lo que el adelanto de unos de los pasos no se vería reflejado en un adelanto en la fecha de finalización total del proyecto. Por lo contrario, si se da un retraso en la fecha de finalización de alguna de las tareas del proyecto, sí que tendría consecuencias negativas, ya que el siguiente paso no podrá comenzar hasta que este terminase y esto se vería reflejado en un retraso en la fecha de finalización del proyecto [48].

Esta pérdida de tiempo podrá ser evitada protegiendo el proyecto en su totalidad en lugar de proteger cada uno de los pasos del proyecto de forma individual. Esto se hará quitando a cada uno de los pasos su margen de tiempo y colocándose al proyecto completo – *Ilustración 11*–.

Este nuevo enfoque nos ofrece la ventaja de que los tiempos estimados para las tareas aseguran una probabilidad del 50% de terminarlas a tiempo (esperando que la mitad de las veces sea antes del tiempo estimado y la otra mitad después). Como resultado, obtenemos un buffer del proyecto de duración mucho menor que la suma de los tiempos de protección eliminados de cada una de las actividades que componen la ruta crítica [48].

Ejecutar diversas actividades se ejecutan en serie supone que si se termina una tarea antes de lo previsto, no se podrá comenzar la siguiente antes de lo establecido. Por lo que esta nueva manera de operar nos protege del problema de dependencia entre las tareas.

El buffer de proyecto será una medida aproximada de la incertidumbre acumulada de todo el proyecto y tiene como objetivo absorber los efectos que se han ido acumulando de las perturbaciones aleatorias [48].

La duración de cada una de las tareas que forman parte del proyecto serán estimadas a través de diversos cálculos estadísticos, basándose en anteriores experiencias o siguiendo las recomendaciones de expertos.

En la siguiente Ilustración se muestra gráficamente el uso de los buffers en un proyecto siguiendo las metodologías tradicionales comparándolo con el uso del buffer de proyecto según la metodología CCPM mostrando el tiempo ganado.

El tamaño de este buffer vendrá determinado según el método de dimensionamiento adecuado para cada caso. Estos métodos los explicaremos más adelante en la subsección 3.4.2.



Ilustración 16- Diagrama Ilustrativo buffer de proyecto. Fuente: Elaboración propia

Los proyectos, en la gran mayoría de los casos, están formados de varias cadenas que alimentan a su vez a otras cadenas, estas uniones se denominan líneas de ensamblaje. Es necesario conocer los efectos que tienen estas cadenas paralelas en la variabilidad de la duración total del proyecto [48].

En la siguiente Ilustración se muestra un proyecto con cadenas paralelas a la cadena más larga. La cadena más larga, en la mayoría de los casos, resulta ser también la ruta crítica. Se puede observar cómo existen dos rutas paralelas a la ruta crítica que estará formada por las tareas 1, 2, 3, 4, 5, 6. La Tarea 6 es una Tarea de ensamblaje. Los trabajos realizados de manera paralela a la ruta crítica se deben terminar antes de que la Tarea 6 (ensamblaje) comience. En el caso de que la *Tarea C* y la *Tarea Y* de las rutas, que se desarrollan de una forma paralela, no hayan concluido, la Tarea 6 no podrá comenzar y aparecería como un “tiempo perdido” en el proyecto.

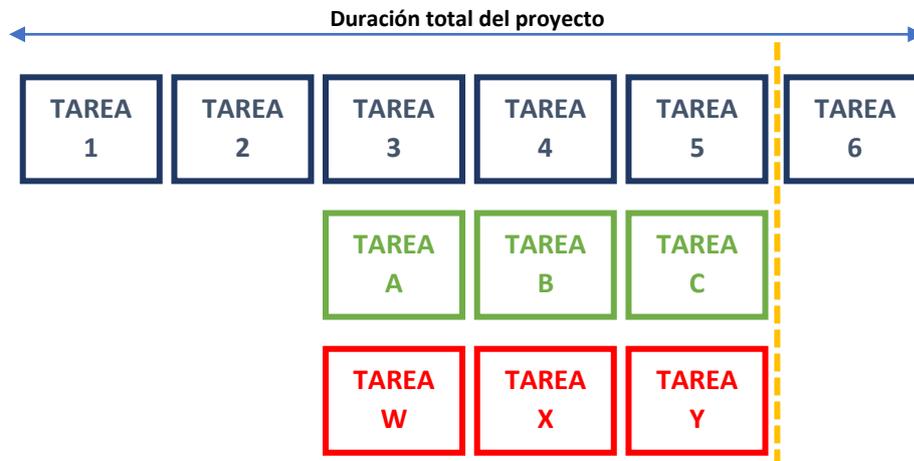


Ilustración 17- Diagrama Ilustrativo1 buffer de alimentación. Fuente: Elaboración propia

Una vez estimados los tiempos medios, la probabilidad de que cada una de las tres cadenas paralelas, consideradas de forma individual, concluyan sus trabajos en la fecha programada será del 50% [48].

Sabiendo que las dos rutas alimentan a la cadena crítica y ambas tienen una probabilidad de terminar en la fecha programada de un 50%, la probabilidad de que estas dos rutas lleguen a tiempo a la operación de ensamblaje será de un 25% (50%*50%). La probabilidad de finalizar el proyecto a tiempo la obtendremos de esta misma forma y será del 12,5% (50%*50%*50%).

Para proteger el proyecto ante la incertidumbre generada haremos uso de buffers de alimentación. Estos deben estar dimensionados con anterioridad de asegurando con una probabilidad elevada que las cadenas de alimentación lleguen a tiempo a la línea de ensamblaje [48].

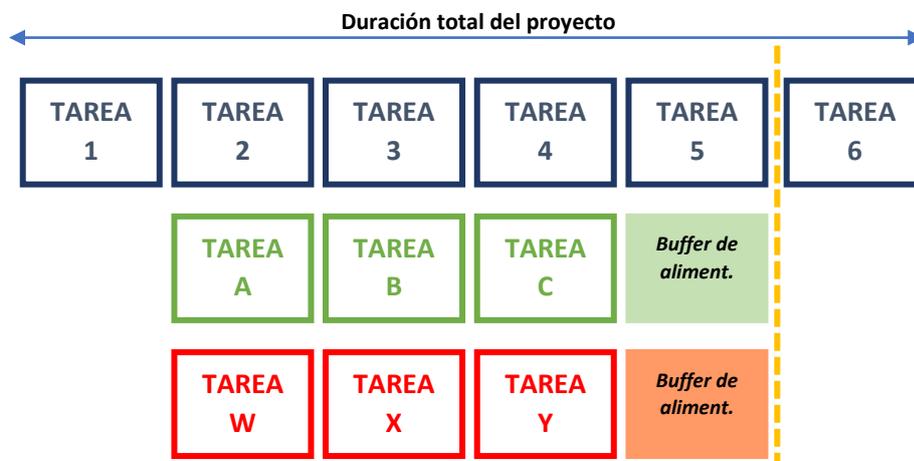


Ilustración 18- Diagrama Ilustrativo buffer de alimentación. Fuente: Elaboración propia

Estos buffers aumentan la probabilidad de que el producto final de cada una de las cadenas de alimentación esté disponible cuando sea necesario, asegurando de este modo el avance del proyecto.

Las probabilidades de entregar el proyecto a tiempo haciendo únicamente uso de los buffers de alimentación son bajas, por lo que no solo debemos proteger el avance del proyecto sino que también debemos de asegurar el cumplimiento de los plazos. Para ello tendremos que insertar los anteriormente explicados buffers de proyecto [48].

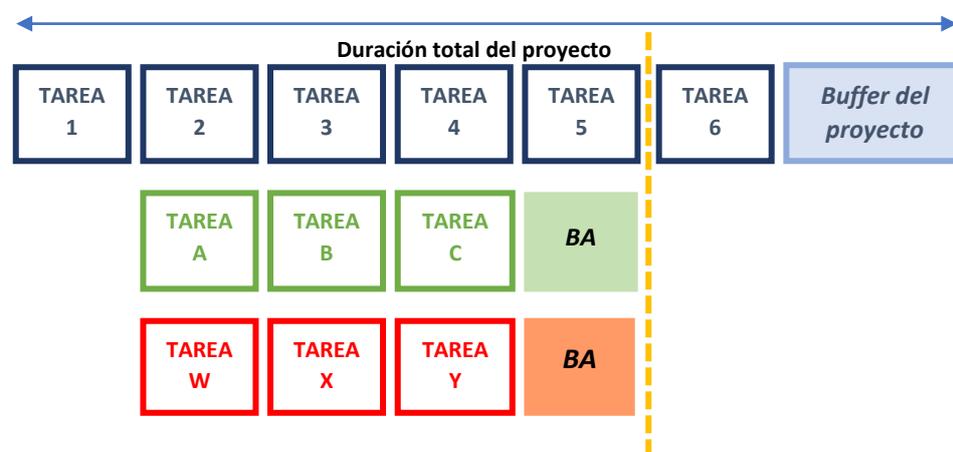


Ilustración 19- Diagrama buffer de alimentación y de proyecto. 'BA' representa el buffer de alimentación de cada cadena. Fuente: Elaboración propia

Una vez insertados estos dos buffers de alimentación, una vez convenientemente dimensionados, la probabilidad de finalización del proyecto dentro del plazo establecido aumenta significativamente.

Si a lo largo del desarrollo de un proyecto, los buffers de alimentación llegan a consumirse, no afectarían a la fecha de finalización prevista del proyecto, ya que estos retrasos impactarán directamente en el buffer de proyecto de una forma negativa. Otra de las ventajas de este tipo de buffers es que no solamente protege al proyecto de las variaciones en los tiempos de ejecución de las tareas que forman la cadena crítica, sino que también protege al proyecto de las variaciones en las rutas no críticas, cuando absorben por completo el buffer de alimentación debido a su alta importancia [48].

4.1.3 Buffers de recurso

El buffer de recurso se añade al cronograma cuando un recurso participa en una tarea específica dentro de la cadena crítica y la actividad que le precede es realizada por otro recurso distinto.



Este tipo de buffers hacen el papel de señales de advertencia anticipadas de los recursos con el fin de proteger al proyecto de las eventualidades que puedan producirse en el momento que se pasa de una tarea a otra y garantizando su disponibilidad en el momento que la cadena crítica los requiera.

Cierto tiempo antes de que el recurso tenga que ser utilizado para el desarrollo de una tarea perteneciente a la cadena crítica, se notifica al encargado del recurso para que esté disponible cuando se vaya a hacer uso de él. Esta notificación se suele hacer repetidas veces a medida que se va acercando la fecha en la que el recurso va a ser requerido. Así, es posible evitar el riesgo de detener el avance del proyecto [48].

Estos buffers, al actuar como un aviso no modifican la duración del proyecto ni consumen unidades de tiempo, por lo que no será necesario su estudio ni habrá que calcular su tamaño. Se colocan de manera escalonada en el tiempo según los acuerdos y la complejidad de las actividades y del proyecto.

Al no añadir costes extra al proyecto se considera que este tipo de buffer solamente aporta beneficios.

4.2 Métodos de dimensionado de buffer

Goldratt identificó la necesidad de colocar amortiguadores a lo largo de la programación de los proyectos como un factor clave para la aplicación del método de la cadena crítica, pero no especificó los pasos que se deben seguir para determinar el tamaño de estos buffers. Esto convirtió el cálculo de la longitud de estos amortiguadores en uno de los principales retos de la utilización del CCPM.

El tamaño de los buffers puede ser mucho más corto que la suma de los amortiguadores individuales que reemplazan, acortando de esta forma el tiempo de las cadenas en su totalidad [49].

Entre las técnicas empíricas más conocidas para el cálculo del tamaño de los buffers destacan:

4.2.1 La Regla del 50% (*Cut and Paste Method – C&PM*)

Esta Regla fue introducida por Goldratt en su libro *Critical Chain* [31] pero quien en realidad definió este procedimiento como *Cut and Paste Method* fue Leach [50] en el año 2014. En ella enunció que tras realizar el cálculo de las duraciones de las tareas con estimaciones optimistas, el tamaño de los buffers fuera el 50% de la duración de la cadena donde se colocaban.

A largo de los años se han propuesto distintas técnicas para calcular el tamaño de los buffers, a pesar de ello, esta es normalmente la preferida por los profesionales.



La regla del 50% nos permite dimensionar los amortiguadores siguiendo cuatro sencillos pasos:

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

A pesar de que normalmente se utiliza el porcentaje del 50% sugerido por el método, este número simplemente debe tomarse como referencia, ya la variabilidad será diferente para cada proyecto y esto hará que las proporciones sean también diferentes en cada caso. En los casos que la incertidumbre del proyecto sea menor podremos ajustarnos a proporciones menores, mientras que en los que sea mayor, se utilizarán porcentajes mayores [51].

Existen unas determinadas recomendaciones a la hora de aplicar la técnica de “Cortar y Pegar”:

- Ninguna actividad puede tener una longitud superior al 20% de la cadena crítica.
- La duración total asignada a los buffers debe ser mayor al 25% del tamaño de la cadena crítica.

Fórmula de cálculo:

$$Buffer = 0,5 \sum_{k=0}^n (Buffer \text{ de cada tarea}) = 0,5 \sum_{k=0}^n (dcP_i - dsP_i)$$

Donde:

n : número de actividades pertenecientes a la cadena crítica

i : actividad

dcP_i : duración de la actividad i con buffer

dsP_i : duración de la actividad i sin buffer

Este método presenta ciertos problemas:

- No tiene en cuenta los problemas de comportamiento en las empresas.
- El tamaño del buffer del proyecto dependerá del tamaño de la cadena de tareas debido a que es un algoritmo lineal, esto supone que en los proyectos de gran duración se obtengan buffers probablemente excesivos [51].



Por ello, solamente se recomienda aplicar este método en empresas de reducido tamaño que trabajan únicamente con un solo proyecto, y con cadenas de tareas cortas [48].

4.2.2 Método del tercio crítico

Esta metodología será una simple variación de la previamente explicada “Ley del 50%”. La principal ventaja del “Tercio Crítico” será la omisión de la duración de las protecciones de las tareas [48].

El desarrollo de este proceso vendrá determinado en cuatro sencillos pasos:

- 1ª. Estimar el tiempo de duración de la cadena.
- 2ª. Eliminar los tiempos de protección de las actividades.
- 3ª. Calcular la longitud de la cadena crítica.
- 4ª. Calcular 1/3 de la longitud obtenida y colocarla como buffer de proyecto o de alimentación.

La fórmula de cálculo vendrá determinada por la ecuación:

$$Buffer = \left(\sum_{k=0}^n (dsP_i) \right) / 3 = \frac{Duración\ de\ la\ cadena\ crítica}{3}$$

donde:

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

i : actividad

dsP_i : duración de la actividad i sin buffer

4.2.3 Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (Square Root of the Sum of the Squares - SSQ)

Esta metodología, también conocida como Fórmula Newbold [52], es una de las alternativas más elaboradas.

El *Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados* no sigue una regla empírica simple para calcular el tamaño de los buffers, sino que para calcular el tamaño del buffer utiliza la variación en la duración de las actividades (Di), que en este caso es conocida.

Esta variación en la duración de las actividades será la diferencia entre la duración de la actividad con seguridad para proteger contra todas las posibles causas de



retrasos (probable, Wi) y la duración de la actividad estimada, la que se realiza con un máximo nivel de recursos y sin interrupciones (optimista, Ai) [53].

$$Di = Wi - Ai$$

El tamaño del buffer se calculará como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la variabilidad (Di) en las actividades individuales pertenecientes al camino crítico. Este método asume que las tareas del proyecto son totalmente independientes [54] [55] [50].

Fórmula de cálculo:

$$Buffer = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i^2)}$$

donde:

n : número de actividades pertenecientes a la cadena crítica

i : actividad

D_i : duración de las actividades

4.2.4 Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error

La Metodología introducida por Ashtiani & Behzad [56] supone una distribución de tipo lognormal para calcular la fecha de finalización de cada una de las tareas. Por otro lado, nos propone un nuevo análisis para poder determinar la escala y los parámetros para cada actividad.

Se hace uso del método de la raíz cuadrada de suma de cuadrados modificándolo para adaptarlo a este nuevo método de dimensionamiento de buffers [56].

El desarrollo de este algoritmo vendrá determinado en cuatro sencillos pasos:

1. Estimar duración de cada actividad en el peor caso, Wi .
2. Obtener la duración media de las tareas según opiniones de expertos o de proyectos anteriores, Mi (utilizada en la metodología CPM).
3. Determinar la desviación estándar de cada tarea que forma parte de la cadena crítica haciendo uso de la siguiente expresión:

$$SDi \approx (Wi - Mi)/1,3$$

4. El tamaño del buffer (TB_j) para una cadena formada por un número de n -actividades se obtiene a través de la ecuación [51]:



$$TB_j = 2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (SD_i^2)}$$

Esta fórmula supone que la suma de las distribuciones se distribuye normalmente (aplicando el teorema central del límite, TCL¹) y hace uso de un buffer del tamaño correspondiente a la longitud de dos desviaciones estándar.

4.2.5 Procedimientos adaptativos de dimensionado del buffer: APD y APRT

Estos procedimientos fueron introducidos por Tukul, Rom & Eksioglu [57] como contrapropuesta a la de Goldartt [31]. Introducen dos métodos de dimensionamiento de buffer adaptativos que basados en que es más probable que se den retrasos cuando la cantidad de los recursos disponibles está cerca de consumirse. Por ello, los buffers deben adoptar mayores dimensiones para tener la capacidad de absorber estos retrasos [53]. Lo mismo ocurrirá con el número de relaciones de precedencia, a medida que el número de estas aumente, la probabilidad de que aparezcan retrasos en el proyecto aumentará a su vez.

Al estar las actividades interrelacionadas, un retraso en la fecha programada de finalización de una tarea determinada tendrá un impacto sobre todas sus sucesoras. Para que esto no ocurra, lo que se deberá hacer es que a medida que el número de relaciones de precedencia aumente, el tamaño del buffer también lo haga [53].

- Procedimiento adaptativo con densidad (*Adaptative Procedure with Density – APD*)

La densidad de la red de una cadena que alimenta a un buffer de proyecto nos indica cómo de densa es la red en lo referido al número de actividades en el proyecto y las relaciones de precedencia entre ellas [57]. Es decir, la densidad, en ocasiones también denominada complejidad (*Coefficient of Network Complexity – CNC*), se reflejará como una proporción del total de relaciones de precedencia de una determinada tarea al número total de tareas que conforman el proyecto [58].

El cálculo del tamaño del buffer se llevará a cabo siguiendo los siguientes pasos:

¹ **Teorema Central del Límite (TCL):** teoría estadística que establece que, dada una muestra aleatoria suficientemente grande de la población, la distribución de las medias muestrales seguirá una distribución normal. Este teorema afirma que a medida que el tamaño de la muestra se incrementa, la media muestral se acercará a la media de la población [60].



1. La densidad de la red (CNC) se calculará como el número de relaciones de precedencia definidas en la cadena j (PRE_j) entre el número de actividades que forman la cadena crítica (N_j).

$$CNC = PRE_j / N_j$$

2. El factor de escala (K) basado en la densidad de la cadena crítica para cada cadena de alimentación será:

$$K = 1 + CNC$$

3. La desviación típica de la cadena (σ_{Cadena}) que alimenta al buffer se obtendrá haciendo uso de la expresión:

$$\sigma_{Cadena} = \sqrt{\Sigma VAR_{ij}} = \sqrt{\sigma_i^2}$$

Siendo: VAR_{ij} : la varianza de la tarea i en la cadena j .

4. La expresión que proporciona el tamaño del buffer (TB_j) situado al final de la cadena de tareas será:

$$TB_j = K \cdot \sigma_{Cadena}$$

- Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (*Adaptative Procedure with Resource Tightness – APRT*)

Esta segunda metodología, con el fin de mostrar la incertidumbre en la alimentación y en las cadenas críticas, incorpora en el proceso de dimensionado del buffer un factor normalmente denominado “*resource tightness*”, en castellano “escasez de recursos”.

Al igual que en el anterior procedimiento, se asume que si la utilización de recursos se encuentra próxima a cumplir su disponibilidad total, las probabilidades de que se produzcan retrasos aumentarán. Y por ello, los buffers aumentarán proporcionalmente.

Para calcularlo se deberán de seguir los siguientes pasos:

1. Calcular el factor de utilización de cada uno de los recursos (*Resource Tightness - RT(q)*), que nos informa de la disponibilidad del recurso q que tenemos para cada cadena de alimentación y para cada recurso empleado en las tareas pertenecientes a esa cadena. El valor de este factor estará comprendido entre 0 y 1 y se deberá calcular para cada recurso q que se emplee en las tareas de la cadena. Su valor vendrá determinado como la relación total entre el uso total de recursos disponibles y la disponibilidad total de recursos.



$$RT(q) \in [0,1] = \frac{\text{Usos total del recurso } q}{\text{Disponibilidad total}} = \frac{\sum_i R(i, q) \cdot D_i}{T * Rav(q)}$$

Siendo:

- $R(i, q)$: el uso del recurso q en la actividad i (en uds. del recurso q)
- D_i : la duración de la actividad i (en uds. de tiempo)
- T : la longitud de la cadena (en uds. de tiempo)
- $Rav(q)$: la disponibilidad total del recurso q (en uds. del recurso q)

2. Se calculará la desviación haciendo uso del teorema central del límite (TCL). La variación de la cadena será igual a la suma de los cuadrados de las desviaciones típicas de las tareas que forman parte de dicha cadena.

$$\sigma_{Cadena} = \sqrt{\sum VAR_i} = \sqrt{\sigma_i^2}$$

Siendo:

- VAR_i : la varianza de la tarea i
- σ_i : es la desviación típica de la tarea i
- σ_{Cadena} : es la desviación típica o estándar de la cadena que alimenta al buffer

3. Para todos los recursos empleados en las tareas de la cadena, se obtiene el valor de r' que corresponde al mayor valor calculado de $RT(q)$.

$$r' = \text{MAX}_q\{RT(q)\}$$

4. El factor de escala K basado en la escasez de recurso vendrá definido por la expresión:

$$K = 1 + r'$$

5. El tamaño del buffer (TB_j) situado al final de la cadena vendrá expresado por la fórmula:

$$TB_j = K \cdot \sigma_{Cadena}$$



IV. CASO PRÁCTICO

A continuación, se mostrará el proyecto de “Mejora de flujos de herramientas” en el que he estado formando parte durante mi periodo de prácticas curriculares y extracurriculares en una factoría de automóviles. Realizaré un estudio de este proyecto haciendo uso de esta metodología y su comparación con la aplicación de otros métodos más tradicionales.

1. Planteamiento del problema

El proyecto que se representa es una planificación para la mejora del flujo de herramientas a nivel de la fábrica entera. El objetivo de este proyecto es unificar los centros de reglaje de herramientas para reducir el tiempo invertido en los desplazamientos hasta estos lugares y la reducción de la Mano de Obra Directa (MOD) para poder reducir los gastos de la empresa.

Entre las actividades principales se encuentran las siguientes:

- Observaciones Continuas
 - Análisis de tiempos
 - Análisis de Flujos
 - Recogida de datos digital 4.0
- Estudios
 - Análisis costes de implantación
 - Estudio implantación de máquinas
 - Comparativa obras nuevas sala de reglaje
 - Optimización MOD necesaria
- Acciones
 - Definición nuevos flujos
 - Definición de responsables
 - Estandarización
 - Plan de formación operarios
 - Aumento polivalencia
 - Ejecución obras nuevas salas CGO
 - Centralización de actividades
 - Implementación nuevos flujos de herramientas
 - Automatización reparto de herramientas

Para la programación del proyecto se tendrán en cuenta los siguientes supuestos:

- La reducción de la duración de las actividades se calculará haciendo uso de las diferentes técnicas empíricas para poder hacer un análisis del método de dimensionado de buffer más viable para este proyecto.



- Las actividades de “Observaciones continuas” tienen cada una sus propios recursos y no se intervienen entre ellos. Es decir, no existe dependencia de recursos en las actividades previas a los “Estudios” y podrán desarrollarse de forma paralela.
- La actividad “Análisis costes de implantación” tendrá una relación Comienzo-Comienzo + 6 semanas (6CC+6s) con la etapa de “Estudio de implantación”. Por lo que la actividad “Estudio de implantación” comenzará 6 semanas después del comienzo de su predecesora.
- La actividad de “Comparativa obras nuevas salas de reglaje” no podrá comenzar hasta que se concluya “Estudio de implantación de máquinas”.
- Hasta que no concluya la actividad “Centralización de actividades” no podrán dar comienzo las actividades de “Optimización de MOD” ni la de “Implementación nuevos flujos de herramientas”. Esta última, a su vez, necesitará que concluya la actividad de “Análisis de costes de implementación” para que comience a ejecutarse.
- La actividad de “Definición de nuevos flujos” no podrá comenzarse hasta que las actividades de “Análisis de tiempo” y “Análisis de flujos” hayan concluido.
- Las acciones de “Definición de responsables” y “Plan de formación de operarios” no podrán llevarse a cabo hasta que se concluya la actividad de “Definición de nuevos flujos”.
- El proceso de “Estandarización” podrá dar comienzo 5 semanas después de que se haya comenzado la actividad de “Definición de responsables”.
- La actividad de “Plan de formación de operarios” no podrá dar comienzo hasta que termine el “Análisis de costes de implementación”.
- El “Aumento de Polivalencia” no se podrá llevar a cabo sin que hayan terminado las tareas de “Definición de responsables” y “Plan de formación de operarios”.
- La “Ejecución de las obras en el CGO” no se desarrollarán hasta que se haya realizado la “Comparativa de las obras de las nuevas salas de reglaje” y se haya desarrollado por completo el proceso de “Estandarización”.
- Para que se dé comienzo al proceso de “Centralización de actividades” tendrán que concluir las actividades de “Aumento de polivalencia” y de “Ejecución obras nuevas salas CGO”.
- El proceso de “Automatización de reparto de tareas” vendrá precedido por las actividades de “Optimización de MOD necesaria” y “Implementación de nuevos flujos de htas.”.
- En la *Tabla 1* vendrán identificadas cada una de las actividades que forman parte del proyecto de una forma simplificada y las relaciones de precedencia entre ellas.



Nombre de tarea	Predecesoras
Observaciones Continuas	
Análisis de tiempos	
Análisis de flujos	
Recogida de datos digital 4.0	
Estudios	
Análisis costes de implantación	
Estudio implantación máquinas	6CC+6 sem.
Comparativa obras nuevas salas de reglaje	7
Optimización MOD necesaria	17
Acciones	
Definición nuevos flujos	3;2
Definición de responsables	11
Estandarización	12CC+5 sem.
Plan de formación operarios	6;11
Aumento Polivalencia	12;14
Ejecución obras nuevas salas CGO	13;8
Centralización de actividades	16;15
Implementación nuevos flujos de htas	17;4
Automatización reparto de htas	9;18

Tabla 1 - Tareas del proyecto y relaciones de precedencia.

- Se tendrá en cuenta el calendario laboral impuesto por la empresa, que será el siguiente:

	Nombre	Comienzo	Fin
1	Puente de la Constitución	06/12/2020	08/12/2020
2	Nochebuena y Navidad	24/12/2020	25/12/2020
3	Vacaciones Navidad	28/12/2020	03/01/2021
4	Reyes	06/01/2021	06/01/2021
5	Semana santa	29/03/2021	04/04/2021
6	Día de Castilla y León	23/04/2021	23/04/2021
7	San Pedro Regalado	13/05/2021	13/05/2021
8	Vacaciones Verano	01/08/2021	22/08/2021
9	Nuestra Señora de San Lorenzo	08/09/2021	08/09/2021

Tabla 2 - Calendario laboral establecido.

2. Cronogramas de referencia

El tiempo que tardan en llevarse a cabo cada una de las actividades estarán basadas en opiniones de expertos. Las duraciones optimistas (A_i), probables (M_i) y pesimistas (W_i) de los expertos consultados se muestran en la Tabla 3.



	Nombre de la tarea	Duración optimista (A_i)	Duración Probable (M_i)	Duración Pesimista (W_i)
Obs. Cont.	Análisis de tiempos	5 sem.	7 sem.	10 sem.
	Análisis de Flujos	3 sem.	6 sem.	8 sem.
	Recogida de datos digital 4.0	6 sem.	9 sem.	12 sem.
Estudios	Análisis costes de implantación	7 sem.	10 sem.	13 sem.
	Estudio implantación de máquinas	1 sem.	2,5 sem.	5 sem.
	Comparativa obras nuevas sala de reglaje	1,5 sem.	3 sem.	6 sem.
	Optimización MOD necesaria	2 sem.	4 sem.	6 sem.
Acciones	Definición nuevos flujos	2 sem.	3 sem.	5 sem.
	Definición de responsables	5 sem.	9 sem.	12 sem.
	Estandarización	8 sem.	11 sem.	15 sem.
	Plan de formación operarios	6 sem.	8 sem.	12 sem.
	Aumento polivalencia	9 sem.	12 sem.	14 sem.
	Ejecución obras nuevas salas CGO	4 sem.	6 sem.	8 sem.
	Centralización de actividades	3 sem.	4 sem.	8 sem.
	Implementación nuevos flujos de htas	1 sem.	2 sem.	4 sem.
	Automatización reparto de htas.	3 sem.	6 sem.	9 sem.

Tabla 3 - Duraciones optimistas, más probables y pesimistas de cada una de las tareas.

Los datos de la Tabla 3 indican que es posible completar cada una de las actividades en su tiempo A_i (duración optimista). Sin embargo, los expertos, al ser preguntados por la duración más probable, añaden, implícitamente, un margen de seguridad en la estimación de la duración de cada actividad, dando lugar a las duraciones probables (M_i) de la Tabla 3.

Podemos comprobar que si llevamos a cabo la programación de las actividades de este proyecto teniendo en cuenta sus duraciones con el margen de seguridad implícito (es decir, las duraciones M_i de la Tabla 3), **la duración resultante del proyecto sería de 50 semanas**. El diagrama de Gantt de esta programación se muestra en la *Ilustración 20*.

En él identificaremos las actividades pertenecientes al camino crítico (en rojo).

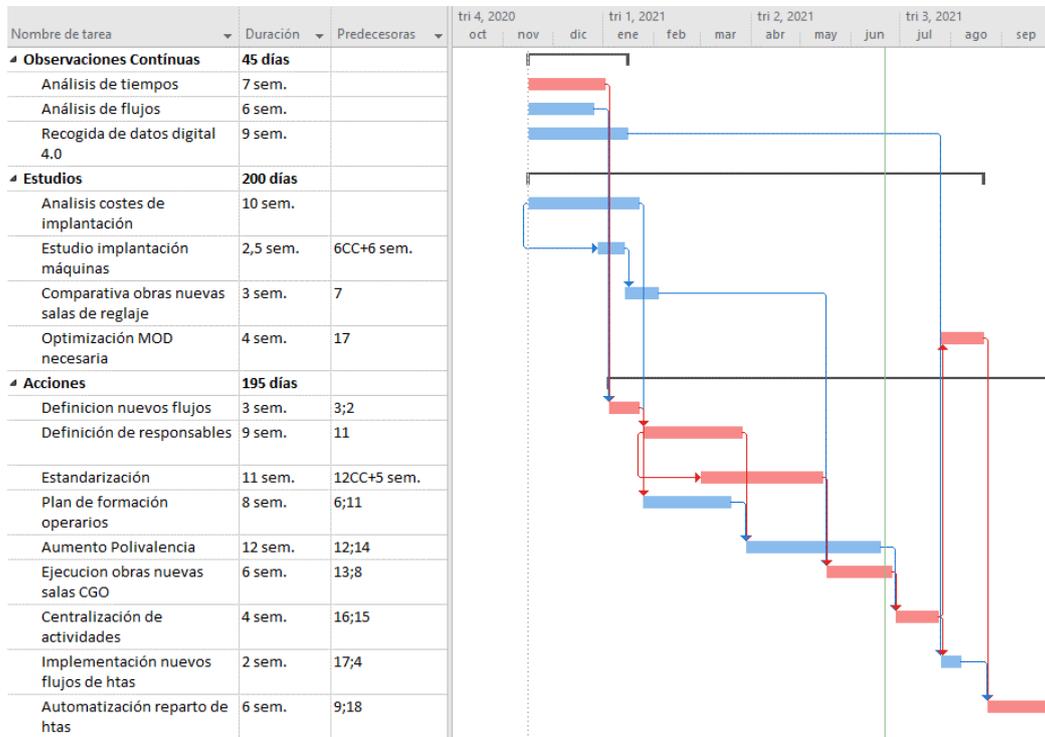


Ilustración 20 - Representación del diagrama Gantt del proyecto cuando las actividades se programan teniendo en cuenta su duración probable según los expertos .

Para obtener la duración total del proyecto cuando se mantienen los márgenes de seguridad implícitos en todas las actividades, sumamos las duraciones de las tareas pertenecientes al camino crítico del proyecto

$$Duración\ proyecto = 7 + 4 + 3 + 9 + 11 + 6 + 4 + 6 = 50\ semanas$$

Por tanto, **la duración del proyecto cuando se tienen en cuenta los márgenes de protección individuales de cada actividad es de 50 semanas.**

Sin embargo, sabemos de antemano que es perfectamente posible que el proyecto pueda llevarse a cabo en un tiempo inferior a 50 semanas. La razón es que todas las actividades (incluyendo las actividades críticas del proyecto) llevan incorporado un margen de seguridad implícito. Si eliminamos este margen implícito en las duraciones de las actividades (es decir, si programásemos el proyecto teniendo en cuenta las duraciones A_i de la Tabla 3), **la duración del proyecto sería de 32 semanas.**

El diagrama de Gantt de esta programación se muestra en la *Ilustración 21*.

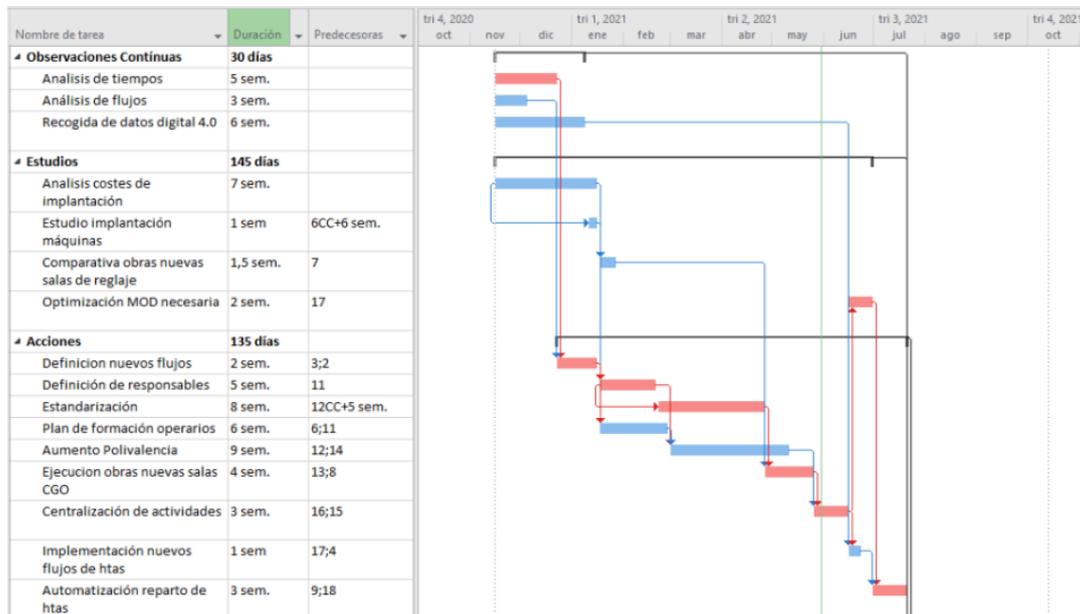


Ilustración 21- Representación del diagrama Gantt del proyecto cuando las actividades se programan teniendo en cuenta su duración optimista según los expertos .

Para obtener la duración total del proyecto cuando se eliminan los márgenes de seguridad implícitos en las actividades, sumamos las duraciones de las tareas pertenecientes al camino crítico del proyecto:

$$\text{Duración proyecto} = 5 + 2 + 2 + 5 + 8 + 4 + 3 + 3 = 32 \text{ semanas}$$

En conclusión, si comparamos las programaciones de la Ilustración 21 y de la Ilustración 20, observemos que si el proyecto se programase teniendo en cuenta las duraciones optimistas (es decir, eliminando las protecciones individuales de la protección de cada actividad), duraciones A_i de la *tabla 3*, la duración del proyecto sería de **32 semanas** (suma de las duraciones de las actividades críticas sin la protección individual). Con las protecciones (implícitas) que se estaban considerando para cada actividad de la cadena crítica (columna M_i de la *tabla 3*), la duración del proyecto es de 50 semanas (suma de las duraciones de las actividades críticas con las protecciones individuales). Esto quiere decir que, cuando se programa el proyecto considerando las protecciones implícitas en cada actividad, de manera implícita **se está considerando una protección para el proyecto de $50 - 32 = 18$ semanas**.

Según la Teoría de las Restricciones, cuando los recursos que ejecutan las actividades son conscientes de que disponen de un tiempo superior al estrictamente necesario para su ejecución, la duración de las actividades tiende a alargarse. Por esta razón, si programamos el proyecto considerando los márgenes implícitos en cada actividad (Ilustración 20), existe una alta probabilidad de que el proyecto termine durando 50 semanas. Por otro lado, cuando programamos el proyecto eliminando los márgenes implícitos en cada actividad (Ilustración 21), aunque teóricamente existe cierta probabilidad de que el proyecto concluya en 32 semanas, cualquier pequeña desviación en la duración de las actividades críticas se trasladaría a la duración total del proyecto. La filosofía de CCPM consiste en programar las



actividades eliminando los márgenes de protección individuales (Ilustración 21, 32 semanas). Como esta programación hace que el proyecto tenga pocas probabilidades de finalizar en la fecha determinada, se añade una protección (buffer) con el objetivo de que este absorba los retrasos (esperables) en la ejecución de cada una de las actividades críticas del proyecto. Al haber eliminado las protecciones individuales, los recursos sienten que tienen un plazo más ajustado para completar las actividades, lo que consigue mitigar los efectos de la ley de Parkinson y del Síndrome del Estudiante. Por otro lado, empleando la metodología CCPM, la duración esperada del proyecto (es decir, 32 semanas más el buffer) es inferior a la duración esperada del proyecto cuando se programa teniendo en cuenta las protecciones implícitas de las actividades (50 semanas).

Por lo tanto, para comparar la duración del proyecto empleando CCPM, usaremos como referencia la programación en la que se tienen en cuenta las protecciones implícitas de cada actividad (50 semanas, Ilustración 20). En la siguiente sección observaremos que, tras añadir un buffer de proyecto a la programación sin protecciones individuales (32 semanas, tabla 21) obtendremos una duración para el proyecto que siempre será inferior a la duración del proyecto cuando se consideran las protecciones individuales (50 semanas). Como además, se mitigan los efectos de la ley de Parkinson y del Síndrome del Estudiante, las programaciones obtenidas aplicando CCPM tendrán una probabilidad mayor de cumplir con la fecha de finalización.

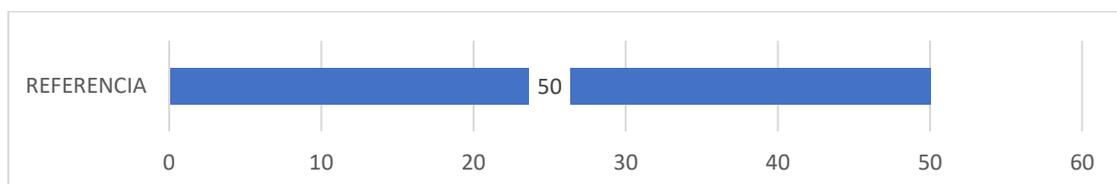


Ilustración 22 – Duración del diagrama de referencia con márgenes implícitos.

3. Aplicación de la metodología CCPM. Dimensionado de buffers.

Tal y como hemos explicado anteriormente, en primer lugar, se realizará una estimación de las duraciones de las cadenas. Posteriormente, se separarán los tiempos de protección de las actividades, se dimensionarán de formas distintas aplicando diferentes procedimientos de dimensionamiento de buffers y se colocarán al final de la cadena crítica.

Para ello, partiremos de las duraciones optimistas (A_i), las duraciones con protección (M_i) de cada una de las tareas que forman parte del proyecto (tabla 3).

Recordemos que el camino crítico del proyecto, identificado anteriormente – Ilustración 20 – está formado por las siguientes actividades:

- Análisis de tiempos
- Optimización MOD necesaria
- Definición nuevos flujos



- Definición de responsables
- Estandarización
- Ejecución obras nuevas salas CGO
- Centralización de actividades
- Automatización reparto de htas.

Los tiempos de protección de cada una de las tareas de la cadena crítica se calcularán como la diferencia entre la duración con protección, M_i , y la duración optimista, A_i .

A partir de este punto, buscaremos el método de dimensionado de buffer más adecuado para el proyecto en cuestión, teniendo siempre en cuenta que el buffer (implícito) de proyecto que se estaba considerando tenía una duración de 18 semanas. Si se mantuviera este tamaño de buffer podrían darse casos de procrastinación de recursos (Síndrome del estudiante – sección 3.3.1), expansión del trabajo a lo largo de todo el tiempo disponible (Ley de Parkinson – sección 3.3.2) o incluso aparecer aspectos no previstos anteriormente que alarguen la fecha de finalización del proyecto (Ley de Murphy – sección 3.3.3). A través de la reducción del tamaño del buffer, se busca acabar con las apariciones de estos sucesos informando a los recursos que tienen un tiempo mucho más ajustado para desarrollar la actividad (se les “despoja” los márgenes implícitos). Estos recursos no conocerán la existencia del buffer del proyecto, que será controlado por el director del proyecto. Por lo que cualquier tamaño de buffer de proyecto inferior al que ya teníamos de 18 semanas, podrá ofrecernos una mejora en la programación del proyecto.

Se mostrará una comparación gráfica de la programación obtenidas usando las duraciones con protección implícita en cada actividad (duraciones M_i mostradas en la *tabla 3*) – 50 semanas – frente a las programaciones obtenidas considerando las duraciones optimistas A_i de la *tabla 3* (es decir, eliminando las protecciones individuales en la duración de cada actividad) más el tamaño de buffer correspondiente a cada uno de los métodos de dimensionado de buffers.

3.1 La Regla del 50% (Cut and Paste Method – C&PM)

En primer lugar, comprobaremos que se cumplen las recomendaciones para aplicar esta metodología:

- ✓ Ninguna actividad puede tener una longitud superior al 20% de la cadena crítica.
- ✓ La duración total asignada a los buffers debe ser mayor al 25% del tamaño de la cadena crítica.

Esta técnica nos permite definir el dimensionamiento de los amortiguadores siguiendo cuatro sencillas etapas:

1. Estimar el tiempo de duración de la cadena.



Se estima que el proyecto tendrá una duración total de 32 semanas (según duraciones optimistas calculadas en la tabla 3).

2. Separar los tiempos de protección de las actividades pertenecientes a la cadena crítica una a una.

En la *tabla 4* se muestran los tiempos de protección de cada una de las actividades pertenecientes al camino crítico que se calcularán como la diferencia entre las duraciones con protección y las duraciones optimistas y vendrán definidas por la expresión:

$$D_i = M_i - A_i$$

Nombre de la tarea crítica	Tiempo de protección (D_i)
Análisis de tiempos	2 sem.
Optimización MOD necesaria	2 sem.
Definición nuevos flujos	1 sem.
Definición de responsables	4 sem.
Estandarización	3 sem.
Ejecución obras nuevas salas CGO	2 sem.
Centralización de actividades	1 sem.
Automatización reparto de herramientas	3 sem.

Tabla 4 – Tiempos de protección de las actividades de la cadena crítica (D_i)

3. Colocar los tiempos de protección al final de la cadena, que será la suma de la última columna de la *tabla 4*.

$$\sum_{k=0}^n (\text{Buffer de cada tarea de la cadena crítica})$$

$$2 + 1 + 1 + 4 + 3 + 2 + 1 + 3 = 18 \text{ semanas}$$

4. Reducir al 50% (en este caso, aplicaremos la proporción genérica) la longitud de la suma de dichos tiempos.

$$0,5 * \sum_{k=0}^n (\text{Buffer de cada tarea de la cad. crítica})$$



$$0,5 * 18 = 9 \text{ semanas}$$

En la *Ilustración 23* se muestra la programación del proyecto tras la inclusión de un buffer de proyecto dimensionado según el método C&PM. A diferencia de la *Ilustración 20*, en la cual se consideró que cada actividad crítica tenía un margen de protección implícito (es decir, para programar las actividades consideramos su duración más probable), en la *Ilustración 23* se ha programado cada una de las actividades con su duración optimista (es decir, eliminando esa protección implícita de cada actividad) y añadiendo un buffer de proyecto cuya duración, 9 semanas, es igual al 50% de la suma de las protecciones implícitas con las que antes contaba la secuencia de actividades críticas.

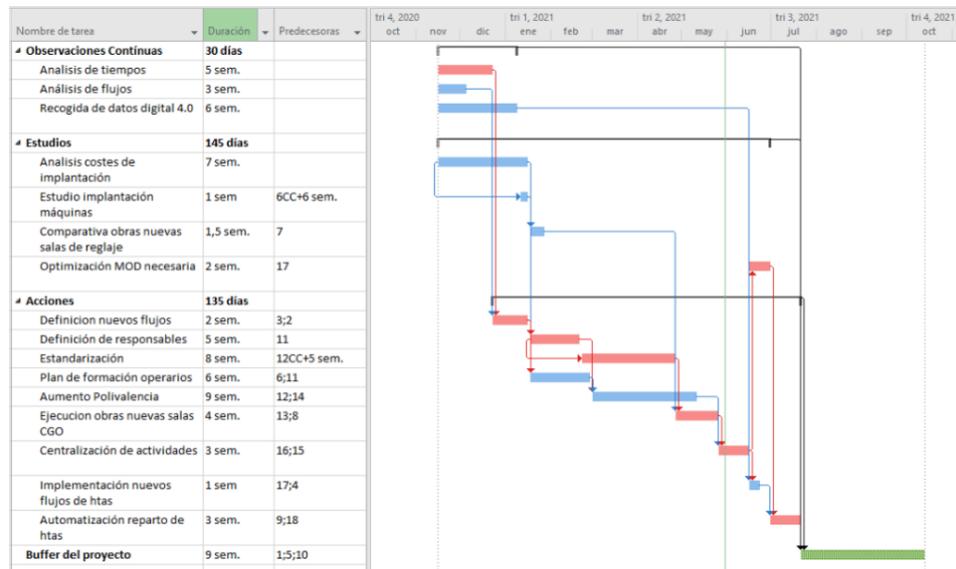


Ilustración 23 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Regla del 50%) con camino crítico en rojo.

En la *Ilustración 24* se muestra la comparativa entre las situaciones resultantes. En el primer eje se muestra la duración del proyecto programándolo con la duración más probable (haciendo uso del margen de protección implícito en la duración de las actividades). En el segundo se eje refleja la duración del proyecto programando las actividades con las duraciones optimistas (es decir, sin protecciones individuales) pero con un buffer de proyecto, en color naranja. Duración: 32 + 9 (buffer) = 41 semanas.

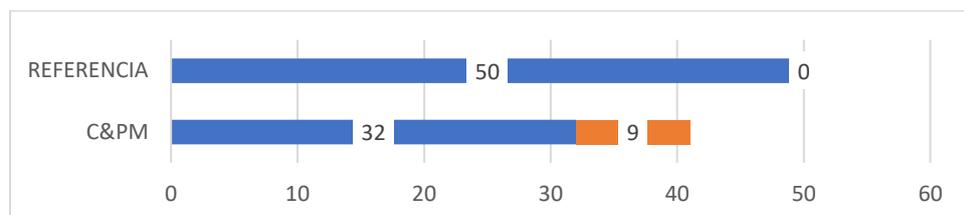


Ilustración 24 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando C&PM



En conclusión, al programar este proyecto incluyendo de un buffer de proyecto dimensionado según el método C&PM nos ahorraríamos un total de $50 - 41 = 9$ semanas.

3.2 Método del tercio crítico

Este método es una variación del método anterior. Para dimensionar el buffer, calculamos un tercio de la suma de las duraciones de las actividades críticas sin la protección (columna de duraciones optimistas, A_i , de la *tabla 4*).

Se ha estimado que el proyecto tendrá una duración total de 32 semanas (según duraciones optimistas calculadas en la *tabla 4*).

Se calculará $1/3$ de la longitud obtenida y se colocará como buffer de proyecto.

$$Buffer = \frac{\text{Longitud cadena crítica sin protecciones}}{3} = \frac{32 \text{ sem.}}{3}$$

$$Buffer = 10,66 \text{ sem.}$$

En la *Ilustración 25* se muestra la programación del proyecto tras la inclusión de un buffer de proyecto dimensionado según el método del Tercio Crítico. A diferencia de la *Ilustración 20*, en la cual se consideró que cada actividad crítica tenía un margen de protección implícito (es decir, para programar las actividades consideramos su duración más probable), en la *Ilustración 25* se ha programado cada una de las actividades con su duración optimista (es decir, eliminando esa protección implícita de cada actividad) y añadiendo un buffer de proyecto cuya duración, 10,66 semanas, que se corresponde con un tercio de la suma de las duraciones de las actividades optimistas, A_i que forman el camino crítico.

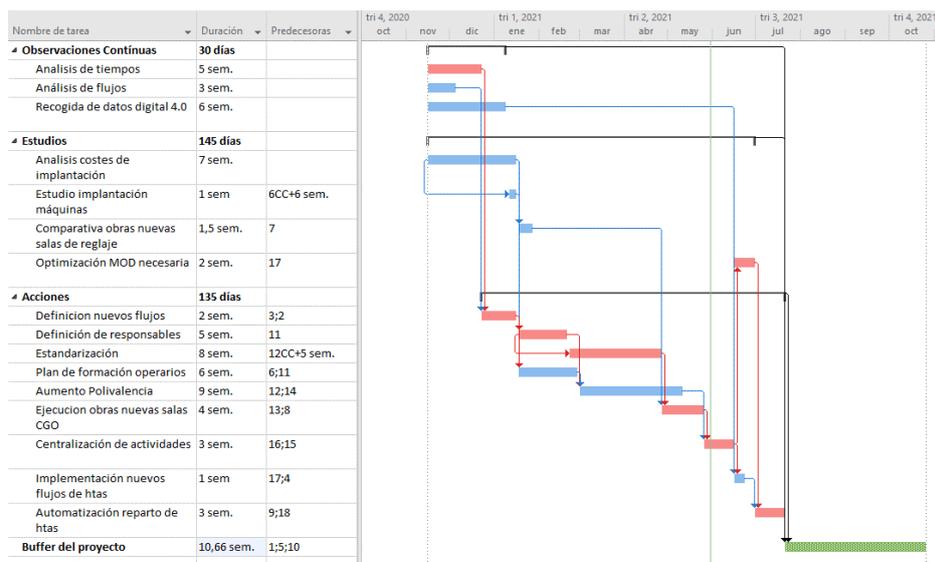


Ilustración 25- Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Método Tercio Crítico) con camino crítico en rojo.

En la *Ilustración 26* se muestra la comparativa entre las situaciones resultantes. En el primer eje se muestra la duración del proyecto programándolo con la duración más probable (haciendo uso del margen de protección implícito en la duración de las actividades). En el segundo eje se refleja la duración del proyecto programando las actividades con las duraciones optimistas (es decir, sin protecciones individuales) pero con un buffer de proyecto, en color naranja. Duración: 32 + 10,66 (buffer) = 42,66 semanas.

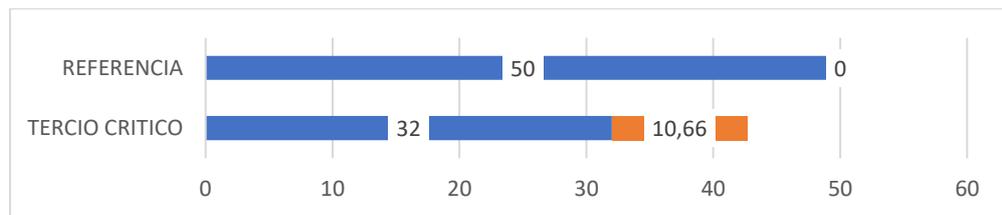


Ilustración 26 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el método del Tercio Crítico.

En conclusión, al programar este proyecto incluyendo de un buffer de proyecto dimensionado según el método del Tercio Crítico nos ahorraríamos un total de 50 – 42,66 = 7,34 semanas.

3.3 Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (*Square Root of the Sum of the Squares - SSQ*)

Este método de dimensionamiento de buffer, bastante similar a los ya explicados anteriormente, hace uso de la variación en la duración de las actividades pertenecientes al camino crítico, D_i – *tabla 4* – que será la diferencia entre la duración de la actividad con seguridad (M_i) para proteger contra todas las posibles causas de retrasos y la duración optimista de la actividad, la que se realiza con un máximo nivel de recursos y sin interrupciones (optimista, A_i) [48].

El tamaño del buffer se calculará como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la variabilidad (D_i) en las actividades individuales pertenecientes al camino crítico, es decir, aplicando la fórmula que se muestra a continuación.

$$Buffer = \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i^2)} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 1^2 + 4^2 + 3^2 + 2^2 + 1^2 + 3^2}$$

$$Buffer = \sqrt{4 + 4 + 1 + 16 + 9 + 4 + 1 + 9} = \sqrt{48}$$

$$Buffer \approx 7 \text{ sem.}$$



En la *Ilustración 27* se muestra la programación del proyecto tras la inclusión de un buffer de proyecto dimensionado según el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SSQ). A diferencia de la *Ilustración 20*, en la cual se consideró que cada actividad crítica tenía un margen de protección implícito (es decir, para programar las actividades consideramos su duración más probable), en la *Ilustración 27* se ha programado cada una de las actividades con su duración optimista (es decir, eliminando esa protección implícita de cada actividad) y añadiendo un buffer de proyecto cuya duración será 7 semanas. Esta duración se corresponde con la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las variabilidades de las actividades pertenecientes al camino crítico.

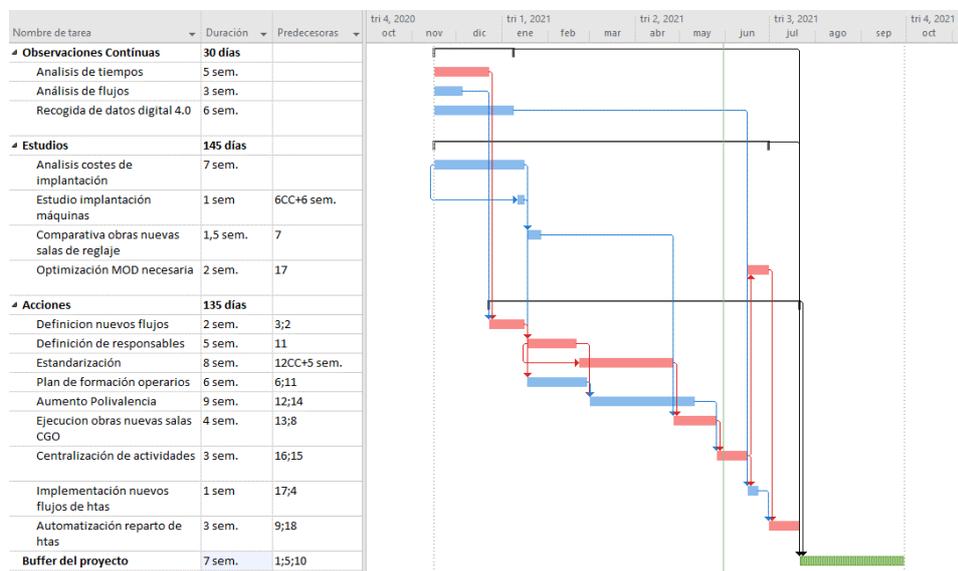


Ilustración 27 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Método Raíz Cuadrada de Suma de Cuadrados) con camino crítico en rojo.

En la *Ilustración 28* se muestra la comparativa entre las situaciones resultantes. En el primer eje se muestra la duración del proyecto programándolo con la duración más probable (haciendo uso del margen de protección implícito en la duración de las actividades). En el segundo eje se refleja la duración del proyecto programando las actividades con las duraciones optimistas (es decir, sin protecciones individuales) pero con un buffer de proyecto, en color naranja. Duración: 32 + 7 (buffer) = 39 semanas.

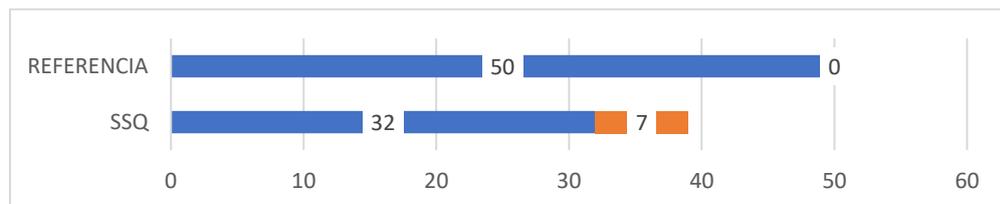


Ilustración 28 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SSQ).



En conclusión, al programar este proyecto incluyendo de un buffer de proyecto dimensionado según el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SSQ) nos ahorraríamos un total de $50 - 39 = 11$ semanas.

3.4 Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error

El desarrollo de este algoritmo vendrá determinado en cuatro sencillos pasos:

1. Estimar duración de cada actividad que pertenece al camino crítico en el peor de los casos. Es decir, haremos uso de las duraciones pesimistas (W_i) según los datos obtenidos de proyectos anteriores o según las opiniones de expertos. Esta información viene mostrada en la *tabla 3*.
2. Obtener la duración media de las tareas según opiniones de expertos o de proyectos anteriores, M_i .

Como esta información no está disponible, en este TFG tomaremos como tiempo M_i de cada actividad el tiempo más probable de la *tabla 3*.

3. Determinar la desviación estándar de cada tarea que forma parte de la cadena crítica haciendo uso de la siguiente expresión:

$$SD_i \approx (W_i - M_i)/1,3$$

Nombre de la tarea crítica	Duración pesimista (W_i)	Duración con protec. (M_i)	Desviación estándar (SD_i)
Análisis de tiempos	10 sem.	7 sem.	2,31 sem.
Optimización MOD necesaria	6 sem.	4 sem.	1,54 sem.
Definición nuevos flujos	5 sem.	3 sem.	1,54 sem.
Definición de responsables	12 sem.	9 sem.	2,31 sem.
Estandarización	15 sem.	11 sem.	3,08 sem.
Ejecución obras nuevas salas CGO	8 sem.	6 sem.	1,54 sem.
Centralización de actividades	8 sem.	4 sem.	3,08 sem.
Automatización reparto de htas.	9 sem.	6 sem.	2,31 sem.

Tabla 5 - Desviación estándar de las actividades del camino crítico.

4. El tamaño del buffer (TB_j) para una cadena formada por un número de n -actividades se obtiene a través de la ecuación [51]:



$$TB_j = 2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (SD_i^2)}$$

$$TB_j = 2 \cdot \sqrt{2,31^2 + 1,54^2 + 1,54^2 + 2,31^2 + 3,08^2 + 1,54^2 + 3,08^2 + 2,31^2}$$

$$TB_j = 2 \cdot \sqrt{34,91} = 2 \cdot 6,5 = 13 \text{ semanas}$$

En la *Ilustración 29* se muestra la programación del proyecto tras la inclusión de un buffer de proyecto dimensionado según el *Método basado en la Raíz Cuadrada del Error*. A diferencia de la *Ilustración 20*, en la cual se consideró que cada actividad crítica tenía un margen de protección implícito (es decir, para programar las actividades consideramos su duración más probable), en la *Ilustración 29* se ha programado cada una de las actividades con su duración optimista (es decir, eliminando esa protección implícita de cada actividad) y añadiendo un buffer de proyecto cuya duración será 13 semanas. Esta duración se corresponde con la raíz cuadrada de la suma de las desviaciones estándar de cada una de las actividades individuales pertenecientes al camino crítico.

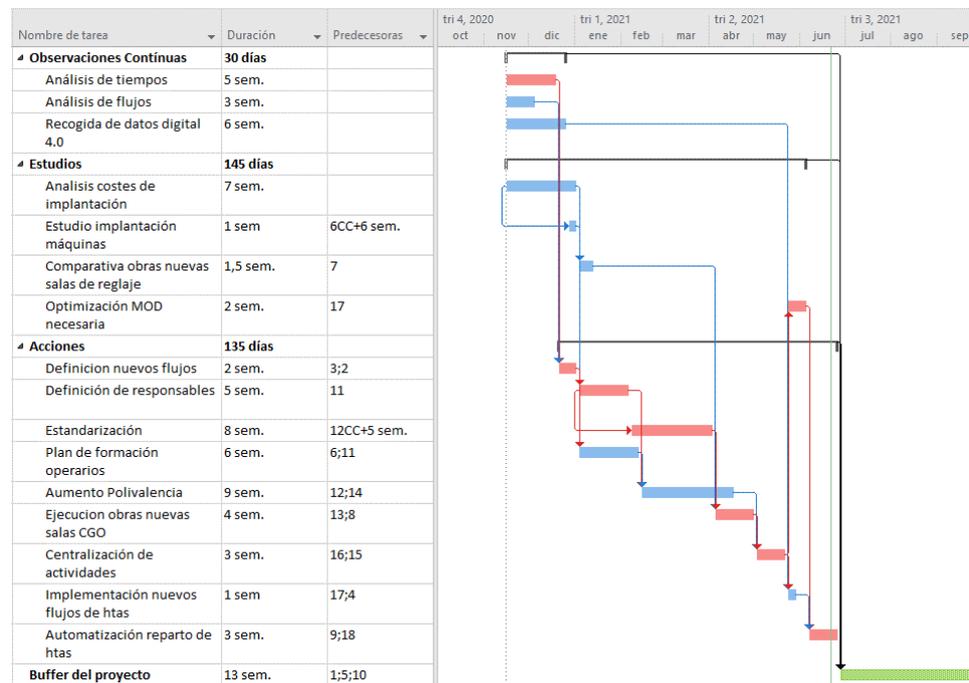


Ilustración 29 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (Método basado en Raíz Cuadrada del Error) con camino crítico en rojo.

En la *Ilustración 30* se muestra la comparativa entre las situaciones resultantes. En el primer eje se muestra la duración del proyecto programándolo con la duración más probable (haciendo uso del margen de protección implícito en la duración de las actividades). En el segundo eje se refleja la duración del proyecto

programando las actividades con las duraciones optimistas (es decir, sin protecciones individuales) pero con un buffer de proyecto, en color naranja. Duración: $32 + 13$ (buffer) = 45 semanas.

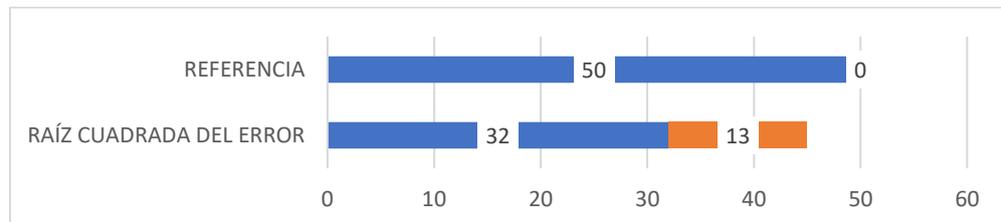


Ilustración 30 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el Método basado en la Raíz Cuadrada del Error

En conclusión, al programar este proyecto incluyendo de un buffer de proyecto dimensionado según el *Método basado en la Raíz Cuadrada del Error* nos ahorraríamos un total de $50 - 45 = 5$ semanas.

3.5 Procedimientos adaptativos de dimensionado del buffer: APD y APRT

- Procedimiento adaptativo con densidad (*Adaptative Procedure with Density – APD*)

El cálculo del tamaño del buffer se llevará a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. La densidad de la red (*CNC*) se calculará como el número de relaciones de precedencia (PRE_j) entre el número de actividades que forman la cadena crítica (N_j).

Estas relaciones de precedencia (PRE_j) vendrán identificadas en la *Ilustración 31*.

El número de actividades que forman la cadena crítica (N_j) será igual a 8.

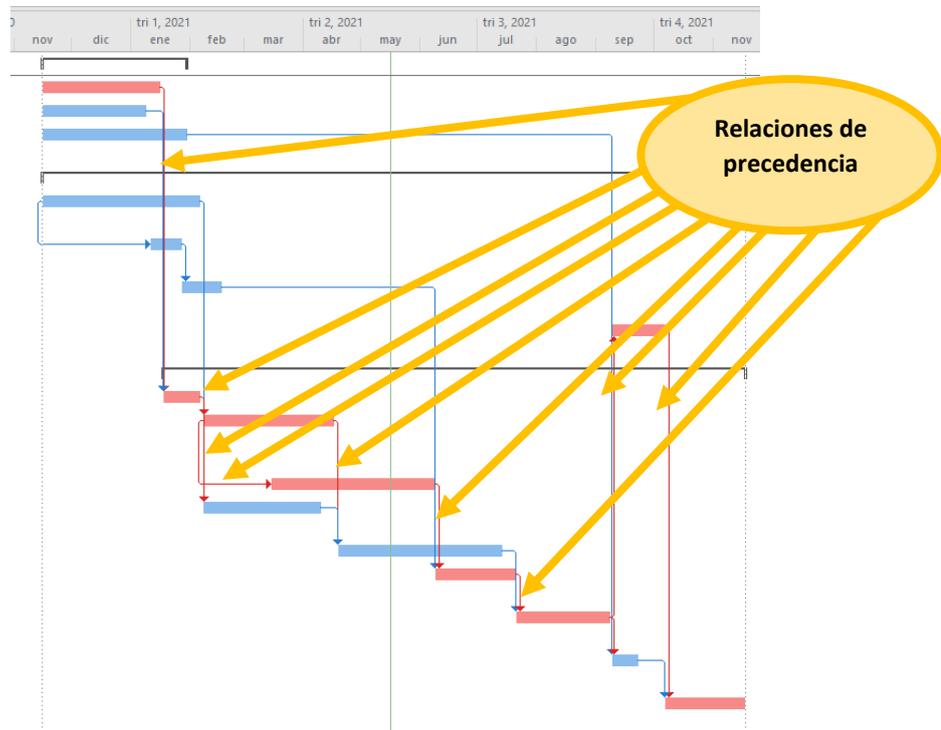


Ilustración 31 - Diagrama de Gantt del proyecto mostrando relaciones de precedencia.

$$CNC = \frac{PRE_j}{N_j} = \frac{9}{8} = 1,125$$

2. El factor de escala (K) basado en la densidad de la cadena crítica para cada cadena de alimentación será:

$$K = 1 + CNC = 1 + 1,125 = 2,125$$

3. La desviación típica de la cadena (σ_{Cadena}) que alimenta al buffer se obtendrá haciendo uso de la expresión:

$$\sigma_{Cadena} = \sqrt{\Sigma VAR_{ij}} = \sqrt{\sigma_i^2}$$

Para ello, haremos uso de los datos de duraciones optimista, con protección y pesimista expuestos en la *tabla 3* a partir de los cuales realizaremos el cálculo del parámetro de la varianza, que nos proporcionará a su vez el cálculo de la desviación típica de la cadena.



Nombre de la tarea crítica	Duración optimista (Ai)	Duración con protec. (Mi)	Duración Pesimista (Wi)	Varianza
Análisis de tiempos	5 sem.	7 sem.	10 sem.	6,33 sem.
Optimización MOD necesaria	2 sem.	4 sem.	6 sem.	4 sem.
Definición nuevos flujos	2 sem.	3 sem.	5 sem.	2,33 sem.
Definición de responsables	5 sem.	9 sem.	12 sem.	12,33 sem.
Estandarización	8 sem.	11 sem.	15 sem.	12,33 sem.
Ejecución obras nuevas salas CGO	4 sem.	6 sem.	8 sem.	4 sem.
Centralización de actividades	3 sem.	4 sem.	8 sem.	7 sem.
Automatización reparto de htas.	3 sem.	6 sem.	9 sem.	9 sem.

Tabla 6 - Duraciones optimista, con protección y pesimista y cálculo de la respectiva varianza.

$$VAR_{ij} = \sqrt{6,33 + 4 + 2,33 + 12,33 + 12,33 + 4 + 7 + 9}$$

$$\sigma_{cadena} = \sqrt{57,33} = 7,57 \text{ semanas}$$

4. La expresión que proporciona el tamaño del buffer (TB_j) situado al final de la cadena de tareas será:

$$TB_j = K \cdot \sigma_{cadena} = 2,125 \cdot 7,57 \approx 16 \text{ semanas}$$

En la *Ilustración 32* se muestra la programación del proyecto tras la inclusión de un buffer de proyecto dimensionado según el *Procedimiento adaptativo con densidad (APD)*. A diferencia de la *Ilustración 20*, en la cual se consideró que cada actividad crítica tenía un margen de protección implícito (es decir, para programar las actividades consideramos su duración más probable), en la *Ilustración 32* se ha programado cada una de las actividades con su duración optimista (es decir, eliminando esa protección implícita de cada actividad) y añadiendo un buffer de proyecto cuya duración será 16 semanas.

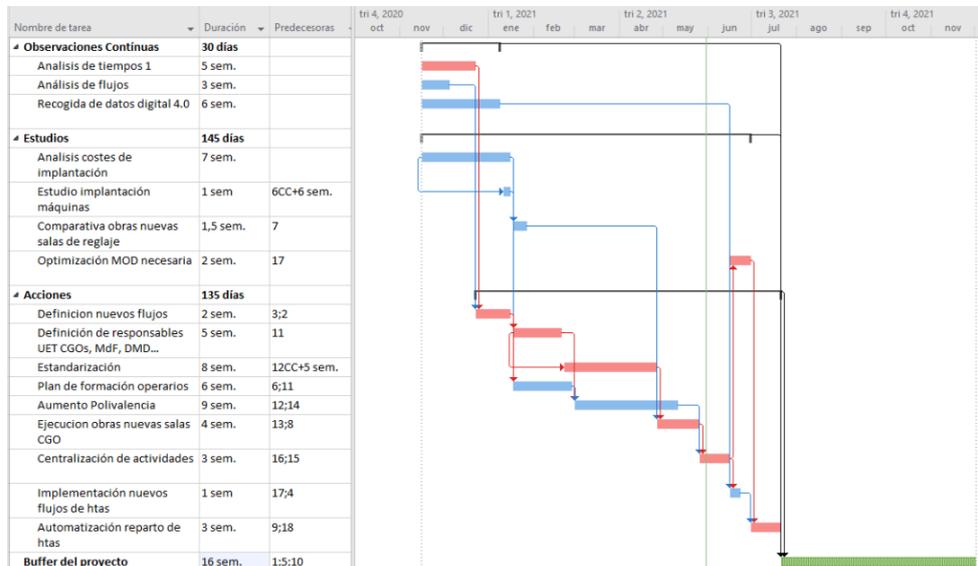


Ilustración 32 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (APD) con camino crítico en rojo.

En la *Ilustración 33* se muestra la comparativa entre las situaciones resultantes. En el primer eje se muestra la duración del proyecto programándolo con la duración más probable (haciendo uso del margen de protección implícito en la duración de las actividades). En el segundo eje se refleja la duración del proyecto programando las actividades con las duraciones optimistas (es decir, sin protecciones individuales) pero con un buffer de proyecto, en color naranja. Duración: 32 + 16 (buffer) = 48 semanas.

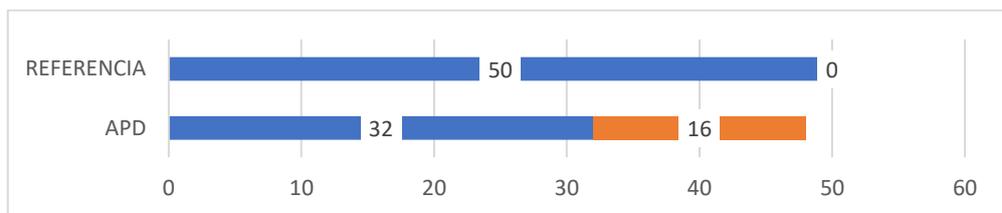


Ilustración 33 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el Procedimiento adaptativo con densidad (APD).

En conclusión, al programar este proyecto incluyendo de un buffer de proyecto dimensionado según el *Procedimiento adaptativo con densidad (APD)* nos ahorraríamos un total de $50 - 48 = 2$ semanas.

- Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (*Adaptive Procedure with Resource Tightness – APRT*)

Para calcularlo se deberán de seguir los siguientes pasos:



1. Calcular el factor de utilización de cada uno de los recursos (*Resource Tightness - RT(q)*). El valor de este factor estará comprendido entre 0 y 1 y se deberá calcular para cada recurso q que se emplee en las tareas de la cadena.

La asignación de recursos (personas) será la mostrada en la *Ilustración 32*:

Nombre de tarea	Duración	Predecesoras	Nombres de los recursos
Observaciones Continuas	30 días		
Análisis de tiempos 1	5 sem.		Becario3;Becario4;Becario2
Análisis de flujos	3 sem.		Becario1;Becario4
Recogida de datos digital 4.0	6 sem.		Becario1;Becario2
Estudios	160 días		
Análisis costes de implantación	7 sem.		Coordinador del proyecto;Director del proyecto; Jefe de Taller 1;Jefe de taller 2
Estudio implantación máquinas	1 sem	6CC+6 sem.	Jefe de unidad 1;Jefe de unidad 2;Jefe de unidad 3
Comparativa obras nuevas salas de reglaje	1,5 sem.	7	Jefe de unidad 1;Jefe de unidad 2;Jefe de unidad 3
Optimización MOD necesaria	2 sem.	17	Jefe de Taller 1;Jefe de taller 2;Jefe de Taller 3
Acciones	150 días		
Definición nuevos flujos	2 sem.	3;2	Coordinador del proyecto;Director del proyecto
Definición de responsables	2 sem.	11	Coordinador del proyecto;Director del proyecto
Estandarización	5 sem.	12CC+5 sem.	Jefe de Taller 1;Jefe de taller 2;Jefe de Taller 3
Plan de formación operarios	8 sem.	6;11	Jefe de unidad 1;Jefe de unidad 2;Jefe de unidad 3
Aumento Polivalencia	6 sem.	12;14	Jefe de unidad 1;Jefe de unidad 2;Jefe de unidad 3
Ejecucion obras nuevas salas CGO	9 sem.	13;8	Empresa Construcción
Centralización de actividades	4 sem.	16;15	Coordinador del proyecto
Implementación nuevos flujos de htas	1 sem	17;4	Becario1;Becario3;Becario4;Becario2
Automatización reparto de htas	3 sem.	9;18	Jefe de Taller 1;Jefe de taller 2;Jefe de Taller 3

Ilustración 34 - Asignación de recursos del proyecto.

El factor de utilización vendrá determinado como la relación total entre el uso total de recursos disponibles y la disponibilidad total de recursos. Lo calcularemos haciendo uso de la siguiente formula:

$$RT(q) = \frac{\text{Uso total del recurso } q}{\text{Disponibilidad total}}$$

Siendo:

- $R(i, q)$: el uso del recurso q en la actividad i (en uds. del recurso q). Este dato vendrá proporcionado por la empresa que desarrolla el proyecto y vendrán determinado según la opinion de expertos o irán basados en la experiencia de proyectos anteriores. Estas proporciones vendrán determindas con la finalidad de conseguir el mayor beneficio posible para la empresa. En este caso, al no contar con esta informacion de la empresa, se ha tenido que recurrir a una elaboración propia de estos datos.



Nombre de la tarea crítica	Recursos utilizados (q)	Uso de recursos $R(i, q)$
Análisis de tiempos	Becario 2	20%
	Becario 3	10%
	Becario 4	30%
Optimización MOD necesaria	Jefe de Taller 1	20%
	Jefe de Taller 2	20%
	Jefe de Taller 3	20%
Definición nuevos flujos	Director del proyecto	30%
	Coordinador del proyecto	20%
Definición de responsables	Director del proyecto	30%
	Coordinador del proyecto	40%
Estandarización	Jefe de Taller 1	15%
	Jefe de Taller 2	20%
	Jefe de Taller 3	25%
Ejecución obras nuevas salas CGO	Empresa Construcción	100%
Centralización de actividades	Coordinador del proyecto	30%
Automatización reparto de herramientas	Jefe de Taller 1	15%
	Jefe de Taller 2	30%
	Jefe de Taller 3	20%

Tabla 7 - Identificación de recursos y uso en el proyecto

- A_i : duración optimista de la actividad i (en uds. de tiempo) – proporcionadas en la *tabla 3*.
- T : la longitud de la cadena (en uds. de tiempo)

$$T = 32 \text{ semanas}$$

- $Rav(q)$: la disponibilidad total del recurso q (en uds. del recurso q). Estos datos nos los proporcionará la empresa y vendrán dados por la opinión de expertos o irán basados en la experiencia de proyectos anteriores. En este caso, al no contar con esta información de la empresa, se ha tenido que recurrir a una elaboración propia de estos datos.



Recursos utilizados (q)	Disponibilidad total $Rav(q)$
Director del proyecto	60%
Coordinador del proyecto	50%
Jefe de Taller 1	10%
Jefe de Taller 2	10%
Jefe de Taller 3	10%
Jefe de Unidad 1	20%
Jefe de Unidad 2	20%
Jefe de Unidad 3	20%
Becario 1	70%
Becario 2	70%
Becario 3	70%
Becario 4	70%
Empresa Construcción	100%

Tabla 8 - Disponibilidad total de recursos en el proyecto.

Por lo que:

Nombre de la tarea crítica	Uso de recursos $\sum_i R(i, q)$	Duración optimista (Di)	Longitud de la cadena (T)	Disponibilidad total $Rav(q)$
Análisis de tiempos	60%	5 sem.	32 semanas	210%
Optimización MOD necesaria	80%	2 sem.		30%
Definición nuevos flujos	50%	2 sem.		110%
Definición de responsables	70%	5 sem.		110%
Estandarización	60%	8 sem.		30%
Ejecución obras nuevas salas CGO	100%	4 sem.		100%
Centralización de actividades	30%	3 sem.		50%
Automatización reparto de herramientas	65%	3 sem.		30%

Tabla 9 - Resumen de datos para cálculo de tamaño de buffer utilizando APRT.

El cálculo del factor de utilización de los recursos disponibles se realizará siguiendo la siguiente fórmula haciendo uso de los datos de la *tabla 9*:



$$RT(q) = \frac{\sum_i R(i, q) \cdot D_i}{T * Rav(q)}$$

Y obtendremos el resultado que se muestra en la *tabla 10* para cada una de las tareas críticas del proyecto.

Nombre de la tarea crítica	Factor de utilización (RT(q))
Análisis de tiempos	0,00892857
Optimización MOD necesaria	0,03333333
Definición nuevos flujos	0,00568182
Definición de responsables	0,01988636
Estandarización	0,1
Ejecución obras nuevas salas CGO	0,025
Centralización de actividades	0,01125
Automatización reparto de herramientas	0,040625

Tabla 10 - Factor de utilización de recursos

- La desviación típica de la cadena (σ_{Cadena}) que alimenta al buffer se obtendrá haciendo uso de la expresión:

$$\sigma_{Cadena} = \sqrt{\Sigma VAR_{ij}} = \sqrt{\sigma_i^2}$$

Para ello, haremos uso de los datos de duraciones optimista, con protección y pesimista expuestas en la *tabla 3* a partir de los cuales realizaremos el cálculo del parámetro de la varianza, que nos proporcionará a su vez el cálculo de la desviación típica de la cadena.

La *tabla 6* nos muestra estos datos, al igual que el cálculo de la desviación típica de la cadena, que tendrá como resultado:

$$\sigma_{Cadena} = 7,57 \text{ semanas}$$

- Para todos los recursos empleados en las tareas de la cadena, se obtiene el valor de r' que corresponde al mayor valor calculado de RT(q) que se muestran en la *tabla 10*.

$$r' = MAX_q\{RT(q)\}$$

$$r' = MAX_q\{0,0089, 0,033, 0,0057, 0,02, 0,1, 0,025, 0,011, 0,041\}$$



$$r' = 0,1$$

- El factor de escala K basado en la escasez de recurso vendrá definido por la expresión:

$$K = 1 + r' = 1 + 0,1 = 1,1$$

- El tamaño del buffer (TB_j) situado al final de la cadena vendrá expresado por la fórmula:

$$TB_j = K \cdot \sigma_{Cadena} = 1,1 \cdot 7,57 \text{ sem} = 8,33 \text{ semanas}$$

En la *Ilustración 35* se muestra la programación del proyecto tras la inclusión de un buffer de proyecto dimensionado según el *Procedimiento adaptativo con escasez de Recursos (APRT)*. A diferencia de la *Ilustración 20*, en la cual se consideró que cada actividad crítica tenía un margen de protección implícito (es decir, para programar las actividades consideramos su duración más probable), en la *Ilustración 35* se ha programado cada una de las actividades con su duración optimista (es decir, eliminando esa protección implícita de cada actividad) y añadiendo un buffer de proyecto cuya duración será 8,33 semanas.

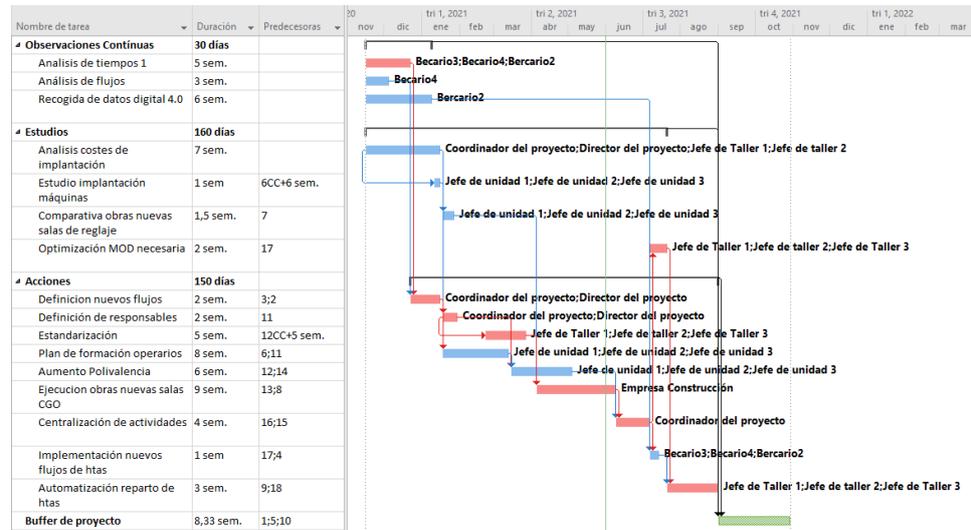


Ilustración 35 - Representación diagrama Gantt aplicando CCPM (APRT) con camino crítico en rojo.

En la *Ilustración 36* se muestra la comparativa entre las situaciones resultantes. En el primer eje se muestra la duración del proyecto programándolo con la duración más probable (haciendo uso del margen de protección implícito en la duración de las actividades). En el segundo eje se refleja la duración del proyecto programando las actividades con las duraciones optimistas (es decir, sin protecciones individuales) pero con un buffer de proyecto, en color naranja. Duración: 32 + 8,33 (buffer) = 40,33 semanas.

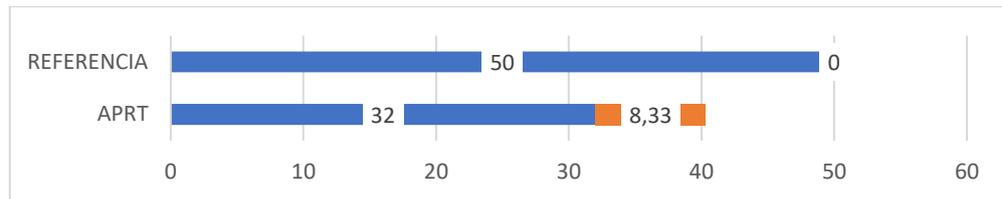


Ilustración 36 – Comparativa de duraciones según programación referente y utilizando el Procedimiento adaptativo con escasez de Recursos (APRT).

En conclusión, al programar este proyecto incluyendo de un buffer de proyecto dimensionado según el *Procedimiento adaptativo con escasez de Recursos (APRT)* nos ahorraríamos un total de $50 - 40,33 = 9,67$ semanas.

4. Discusión de los resultados. Análisis de la Cadena Crítica

Determinar el tamaño de los buffers del proyecto será mucho más importante en proyectos que se desarrollan en un entorno de gran incertidumbre, que en aquellos que su incertidumbre es menor [57].

En esta ocasión hemos hecho uso de un buffer de proyecto añadiéndolo al final del camino crítico, tras el estudio de los diferentes métodos de dimensionado de buffer, se pueden observar grandes variaciones mostradas en la *Tabla 12*.

Método de cálculo	Tamaño de buffer de proy.	Duración total
La Regla del 50% (C&PM)	9 sem.	41 sem.
Método del tercio crítico	10,66 sem.	42,66 sem.
Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SSQ)	7 sem.	39 sem.
Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error	13 sem.	45 sem.
Procedimiento adaptativo con densidad (APD)	16 sem.	48 sem.
Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (APRT)	8,33 sem.	40,33 sem.

Tabla 11 - Comparación de los tamaños de los buffers haciendo uso de las diferentes metodologías de dimensionado.

Tras este estudio hemos observado que cada uno de los métodos de dimensionamiento del buffer de proyecto dan lugar a tamaños diferentes del mismo y, por tanto, a duraciones distintas para el proyecto. El objetivo es que el tamaño del buffer sea el adecuado para absorber las posibles desviaciones en las duraciones de las actividades durante la ejecución del proyecto.

Para la selección de un método o de otro deberá tenerse en cuenta el factor que se considere que tiene mayor influencia en el proyecto. Este factor vendrá definido por el juicio personal en el que el tipo de proyecto, la planificación, la comparación con casos similares,



la experiencia, el grado de incertidumbre y la utilización coherente de las técnicas del CCPM serán esenciales para que el método elegido se implemente de una forma exitosa [51]. Teniendo en cuenta este factor, se analizan las ventajas e inconvenientes – *Tabla 13* – de cada una de las metodologías para llegar a elegir el procedimiento más adecuado para calcular el tamaño del buffer.

Método de cálculo	Ventajas	Inconvenientes
La Regla del 50% (C&PM)	Facilidad y comodidad práctica El procedimiento de cálculo se puede adaptar empleando proporciones menores para proyectos con menor variabilidad y porcentajes mayores para aquellos con mayor incertidumbre	Es necesario tener una planificación sobredimensionada para el cálculo de los buffers. Esto hace que no sea posible planificar un proyecto desde origen implementando la metodología CCPM.
Método del tercio crítico	Solamente es necesario conocer el tiempo requerido para cada actividad (sin holguras). Será muy útil para proyectos planificados inicialmente con una metodología CCPM.	El tamaño del buffer aumenta de forma lineal con el tamaño de la secuencia de tareas que protege, añadiendo un buffer excesivamente grande para los proyectos de gran duración.
Método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SSQ)	Funciona muy bien en proyectos con bajas incertidumbres o con poca probabilidad de sufrir variaciones. Permite explicar estas variaciones en las duraciones de tareas	Puede conducir a buffers de tamaños menores para cadenas de larga duración. Al tener que realizar dos cronogramas distintos (con protección y sin ella), no será útil para proyectos que pretendan aplicar CCPM desde el inicio de la programación del proyecto.
Método de Ashtiani et al. (2007) basado en la raíz cuadrada del error	Proporciona un tamaño de buffer superior al del SSQ. Esto se podría ver representado en una mejora con respecto al método original.	La duración media de las tareas viene proporcionada por opiniones de expertos o de proyectos anteriores y puede no ser correcta en algunas ocasiones y conducir a error.
Procedimiento adaptativo con densidad (APD)	Tiene en cuenta la densidad de la red. El número de tareas pertenecientes a la cadena crítica y las relaciones de precedencia de la misma. Ofrece protección suficiente para afrontar los retrasos que se producen en la fecha de finalización del proyecto.	Al tener que realizar dos cronogramas distintos (con protección y sin ella), no será útil para proyectos que pretendan aplicar CCPM desde el inicio de la programación del proyecto.
Procedimiento adaptativo con escasez de recursos (APRT)	Tiene en cuenta la disponibilidad de los recursos y la complejidad de la cadena. Ofrece protección suficiente para afrontar los retrasos que se producen en la fecha de finalización del proyecto.	Se ha de conocer la disponibilidad total de los recursos. En ocasiones, esta información puede ser difícil de determinar en un proyecto. Al tener que realizar dos cronogramas distintos, no será útil para proyectos que pretendan aplicar CCPM desde el inicio de la programación del proyecto.

Tabla 12 - Ventajas e inconvenientes de las diferentes metodologías de dimensionamiento de buffers.

Fuente: [51] [53] [57].



En la *Ilustración 37* se pueden observar las distintas dimensiones del buffer de alimentación en función del método de dimensionamiento utilizado. En todos los casos, la duración del camino crítico (una vez eliminado el margen de protección de las actividades) es de 32 semanas, pero distintos métodos dan lugar a distintas duraciones del proyecto. En función de la situación real del proyecto a gestionar (según las consideraciones de la tabla 19), sería más conveniente la utilización de uno y otro método.

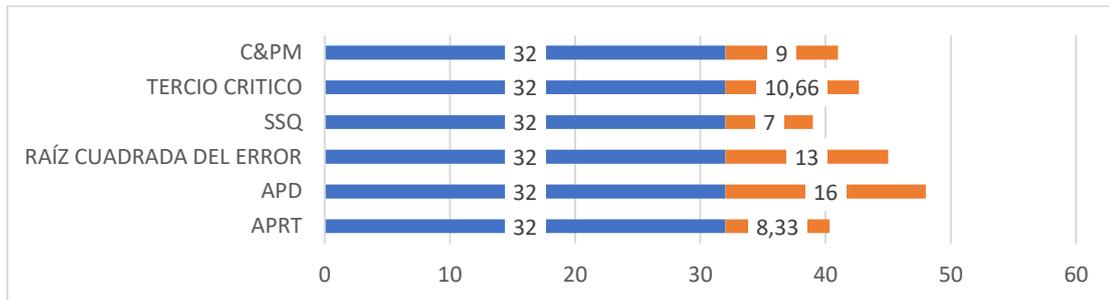


Ilustración 37 - Comparación de las duraciones haciendo uso de las diferentes metodologías de dimensionado de buffer.



Universidad de Valladolid

**Gestión de Proyectos mediante cadena crítica
(CCPM Critical Chain Project Management)**



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



V. CONCLUSIONES

La implantación de la metodología de la Cadena Crítica nos ofrece una mejora de la planificación, el seguimiento y el control de proyectos con respecto a los métodos tradicionales. CCPM nos permite reducir los plazos en los que se desarrolla un proyecto a la vez que aumentan las probabilidades de concluir el proyecto en la fecha programada. Esto es debido a la introducción de diferentes tipos de protecciones (buffers) a lo largo del proyecto que nos permiten afrontar las incertidumbres de plazo asociadas a cada una de las actividades del proyecto.

Las protecciones (buffers) han de ser dimensionados considerando las necesidades y requerimientos de cada proyecto. Por un lado se debe prestar una especial atención a la dificultad de empleo de cada uno de estos métodos o el tamaño del buffer resultante. Por otro lado, en el momento de realizar una estimación de tiempo lo más precisa posible se ha de tener en cuenta la cantidad y la calidad de la información disponible, ya que si esta es insuficiente o incorrecta, puede conducir a un error en el cálculo de las dimensiones de los buffers.

A lo largo de este TFG, se ha introducido la Metodología CCPM explicando sus orígenes, motivación y modo de funcionamiento. Se ha expuesto también un ejemplo de aplicación de los métodos de dimensionado de los buffers de proyecto, acompañándolo de una breve discusión sobre la conveniencia de la utilización de un método u otro.

No existe un método predefinido para el cálculo de la duración de estos amortiguadores de tiempo. En numerosas ocasiones, se opta por aplicar la metodología de más sencilla aplicación para el cálculo de la duración de estas protecciones. El orden de los procedimientos estudiados, clasificándolos de mayor a menor dificultad de programación, sería: C&PM, SSQ, Tercio Crítico, Método de Ashtiani et al. (2007), APRT y APD.

La continuación de este proyecto vendrá de la mano de una investigación acerca del método de dimensionamiento de buffer de proyecto más adecuado para cada caso de una forma mucho más sencilla. Seguido por un estudio de los métodos de dimensionamiento de buffers de alimentación y cómo situarlos a lo largo del proyecto para no modificar la duración de este. Por otro lado, se podría investigarse la viabilidad de cada uno de estos métodos de dimensionamiento de buffers y si estos cumplen con los objetivos establecidos al comienzo del proyecto.



Universidad de Valladolid

**Gestión de Proyectos mediante cadena crítica
(CCPM Critical Chain Project Management)**



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



BIBLIOGRAFÍA

- [1] PMI, Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK) - Sexta Edición., 2017.
- [2] IPMA, Individual COmpetende Baseline (for Project, Programme & Portfolio Management) - 4th Version, 2019.
- [3] D. Poza, «Apuntes Dirección de Proyectos - Introducción a la Dirección de Proyectos,» Septiembre 2019. [En línea].
- [4] C. Ollé y B. Cerezuela, «¿Qué es la gestión de proyectos?,» de *Gestión de proyectos paso a paso*, UOC, 2018, pp. 15-17.
- [5] G. TIC, «Gestión de proyectos,» 11 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.ticportal.es/glosario-tic/gestion-proyectos>. [Último acceso: Abril 2021].
- [6] Escuela de Project Management, «Breve historia sobre la administración de proyectos,» Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.edpm.es/index.php/noticias/item/14-breve-historia-sobre-la-administracion-de-proyectos#:~:text=1969.,profesi%C3%B3n%20de%20administraci%C3%B3n%20de%20proyectos..> [Último acceso: 28 Abril 2020].
- [7] «CB (IPMA Competence Baseline),» [En línea]. Available: <http://www.proyectosfindecarrera.com/ICB-IPMA%20COMPETENCES%20BASELINE.htm>. [Último acceso: 28 Abril 2021].
- [8] AEC, «NORMA ISO 21500,» [En línea]. Available: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-iso-21500>. [Último acceso: 28 Abril 2021].
- [9] C. d. E. e. G. d. Proyectos, «Metodología de Gestion de Proyectos PM2,» [En línea]. Available: https://catedras.ugr.es/openpm2/sites/webugr/copenpm2/public/inline-files/PM%C2%B2-Overview_Final_Espa%C3%B1ol.pdf. [Último acceso: 28 Abril 2021].
- [10] A. f. P. Management, «APM - the chartered body for the project profession,» APM, [En línea]. Available: <https://www.apm.org.uk/>.
- [11] N.-A. Moreno Monsalve, L.-M. Sánchez Ayala y J.-D. Velosa García, «La gestión del alcance,» de *Introducción a la gerencia de proyectos: conceptos y aplicación: Conceptos y Aplicación.*, Bogotá, Colombia, UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812, 2017, pp. 95-96.
- [12] Project Management Institute, PMBOK® Guide – Sixth Edition, 2017.



- [13] A. Aranda; W. Neira, «Seguimiento a la gerencia para proyectos de vías terciarias en Colombia valorando alcance, tiempo y costo, basados en el PMBOK® (Tesis de Pregrado),» Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia., 2019.
- [14] E. d. I. Industriales, *Apuntes Ingeniería de Organización 2º Curso*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2018.
- [15] F. Patrick, «Critical chain scheduling and Buffer management.,» de *Proceedings of the Project Management Institute*, Philadelphia, PA, USA., 1999, pp. 10-16.
- [16] EAE Business School, «Retos en Supply Chain: ¿Qué es holgura? Manejando los tiempos en proyectos,» 29 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/que-es-holgura-manejando-los-tiempos-en-proyectos/>. [Último acceso: 29 Abril 2021].
- [17] C. M. Martín, «Trabajo de fin de grado - Generación Automática de Diagramas de Gantt,» Universidad Politécnica de Madrid (UPM) , Madrid, 2021.
- [18] D. Poza, «Introducción a la elaboración de un plan de gestión de un proyecto - Apuntes IOI,» septiembre 2019. [En línea].
- [19] E. O. Industrial, «Master en Gestión de Calidad y Reingeniería de Procesos: Material de estudio (Gestión de Proyectos),» EOI, 2014.
- [20] L. M. E. TORRES, «Método de Ruta Crítica – CPM (Critical Path Method),» Escuela Organización Industrial - Master Executive en Administración y Dirección de empresas, 14 Abril 2013. [En línea]. Available: <https://www.eoi.es/blogs/madeon/2013/04/14/metodo-de-ruta-critica-cpm-critical-path-method/>. [Último acceso: 2 Mayo 2021].
- [21] E. R. Arias, «Diagrama CPM,» [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/diagrama-cpm.html#:~:text=El%20origen%20del%20diagrama%20CPM,con%20ello%2C%20los%20costes%20implicados..> [Último acceso: 2 Mayo 2021].
- [22] P. Weaver, « A BRIEF HISTORY OF SCHEDULING - BACK TO THE FUTURE,» de *A BRIEF HISTORY OF SCHEDULING*, Hyatt (Canberra), 2006.
- [23] C. O. Ukamaka, «Implementation of Project Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM): A Comparative Study,» *International Journal of Industrial and Operations Research*, 02 March 2020.
- [24] B. LH, «Planificación y control a muy corto plazo,» [En línea]. Available: https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/PPFM/PP/PP04/es_PPFM_PP04_Contenidos/website_63_mtodo_roy.html. [Último acceso: 2 Mayo



- 2021].
- [25] J. López, «Metodo ROY,» [En línea]. Available: <https://juliopezblog.files.wordpress.com/2016/09/roy.pdf>. [Último acceso: 5 Mayo 2021].
- [26] E. B. SCHOOL, «DIRECION DE PROYECTOS - Como elaborar el plan de estimación de los recursos de un proyecto,» 1 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.ealde.es/estimacion-recursos-proyecto/>. [Último acceso: 2 Mayo 2021].
- [27] Erik Leuven Demeulemeester, Willy Herroelen, Robust Project Scheduling ISBN: 9781601984340, 2002.
- [28] Juan C. Rivera, Luis F. Moreno, F. Javier Díaz, Gloria E. Peña , «HEURISTIC FOR SCHEDULING OF PROJECTS WITH RESTRICTION OF RESOURCES,» *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada - Escuela de Sistemas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia*, vol. 1, nº 6, pp. 121-122, 2006.
- [29] J Blazewicz, JK Lenstra, AH Rinnooy Kan, Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity., *Discret Appl Math*, 1983.
- [30] Daniel Morillo, Luis Moreno, Javier Díaz, «Analytic and Heuristic Methodologies for Solving the Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP): a Review. Part 2,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, nº 20, 2014.
- [31] E. M. Goldratt, *Critical Chain*, North River Press, 1997.
- [32] D. L. Amendola y D. T. Depool, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS CRITICAL CHAIN PROJECT MANAGEMENT (CCPM) Y CAMINO CRÍTICO (CPM) EN LA DIRECCIÓN Y GESTIÓN DE PROYECTOS,» 24 Abril 2017. [En línea]. [Último acceso: Mayo 2021].
- [33] Amendola. L; Depool. T. (P); González. J.M, «MODELO ESTRATÉGICO PARA LA DIRECCIÓN Y GESTIÓN DE MULTIPROYECTOS BASADO EN EL CRITICAL CHAIN (CCPM),» de *12th International Conference on Project Engineering*.
- [34] E. C. Moura, A. Barnard, «The Need to Integrate TOC, Lean, Six Sigma and Process Management,» *Qualiplus Consulting.*, 2006, 2010.
- [35] P. Álvarez, «Teoría de Restricciones, TOC. Fundamentos y aplicaciones,» *Gestiópolis*, [En línea]. Available: <https://www.gestiopolis.com/teoria-de-restricciones-toc-fundamentos-y-aplicaciones/>. [Último acceso: Mayo 2021].
- [36] E. M. Goldratt, *La Meta*, North River Press, 1984.
- [37] C. Pastrana, «La Teoría de las Restricciones (TOC): cómo superar los cuellos de botella,»



- IEBS Emprendedores - Negocios Internacionales, 20 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.iebschool.com/blog/teoria-restricciones-negocios-internacionales/>. [Último acceso: 2021].
- [38] EAE Business School, «CCPM, gestión de proyectos por Cadena Crítica,» Retos en Supply Chain, 24 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/ccpm-gestion-de-proyectos-por-cadena-critica/>. [Último acceso: 11 Mayo 2021].
- [39] R. Ramirez Santos, «FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DE LAS RESTRICCIONES,» 2012. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/114927928/FUNDAMENTOS-DE-LA-TEORIA-DE-LAS-RESTRICCIONES#scribd>. [Último acceso: 12 Mayo 2021].
- [40] ESAN - Apuntes Empresariales, *¿Qué es el método DBR y cómo funciona?*, 2015.
- [41] M. Zosim, «Methodology of 'Drum-Buffer-Rope',» *TQM SYSTEMS*, 23 Junio 2020.
- [42] Alicia Arias Coello. Facultad de Ciencias de la Documentación, «UNIDAD DIDACTICA 1: La Gestión de la Calidad. Conceptos Básicos,» [En línea]. Available: <http://webs.ucm.es/centros/cont/descargas/documento10123.pdf>. [Último acceso: 7 Mayo 2021].
- [43] International Organization for Standardization., «ISO 8402:1994 - Quality management and quality assurance — Vocabulary,» British Standard. European Standard., 1994.
- [44] E. Management, *Calidad Total (TQM) & Mejora Continua*.
- [45] EAE BUSINESS SCHOOL, «Guía PMBOK: Definición estructura y tips de estudio,» 14 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/que-es-la-guia-pmbok-y-como-influye-en-la-administracion-de-proyectos/>. [Último acceso: 7 Mayo 2021].
- [46] Vázquez García, Elena; Amiama Ares, Carlos; Barrasa Rioja, Martín, «APPROACH TO THE APPLICATION OF THE CRITICAL CHAIN METHOD TO THE CONSTRUCTION PROJECTS,» de *19th International Congress on Project Management and Engineering*, Granada, 2015.
- [47] Rivera, F. A.; Durán, A, «Una reflexión sobre los fundamentos y la aplicabilidad de cadena crítica en proyectos de ingeniería,» 2003, pp. 10-13.
- [48] José Luis Iglesias Sánchez, «GESTIÓN DE PROYECTOS (III): Los buffer del proyecto,» de *Partida Doble num.167*, 2005, pp. 76-85.
- [49] C. Urso, «Planificación del Tiempo. Utilizando Cadena Crítica y Buffer Management. PM Value,» 2005. [En línea]. Available: <http://www.pmvalue.com.ar/>. [Último acceso: Mayo 2021].



- [50] L. P. Leach, *Critical Chain Project Management*, 2014.
- [51] Elena Vázquez García; Carlos Amiama Ares; Martín Barrasa Rioja, «Critical chain: Sizing the project buffers,» 12-14 July 2017. [En línea]. Available: <http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/338/AT01-011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [52] R. Newbold, «Project Management in The Fast Lane: applying the Theory of Constraints,» *London: CRC Press*, 1998.
- [53] Fuentes Del Burgo, Joaquin; Ruiz Fernández, Juan Pedro; Valverde Gascueña, Nelia, «REVIEW OF BUFFER'S SIZING METHODS IN CRITICAL CHAIN PROJECT MANAGEMENT,» 11-13 July 2018. [En línea]. Available: http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1719/AT01-009_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [54] W. Herroelen y R. Leus, «On the merits and pitfalls of critical chain scheduling,» *Journal of Operations Management* 19, pp. 559-577, 2001.
- [55] Bie Li; Nanfang Cui; Xiaoming Zhang, «Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling,» *International Journal of Production Research*, Diciembre 2012.
- [56] B. Ashtiani, G. R. Jalali, M. B. Aryanezhad y A. & Makui, «New approach for buffer sizing in Critical Chain scheduling,» de *Industrial Engineering and Engineering Management*, 2007.
- [57] Tukel, Rom y Eksioglu, «An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling,» *European Journal of Operational Research*, vol. 172., pp. 401-416, 2006.
- [58] A. Slusarczyk, D. Kuchta, P. Verhulst, W. Huyghe, K. Laurysen y T. Debal, «A Comparison of Buffer Sizing Techniques in the Critical Chain Method. Case study.,» *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. VOLUME 7, N° 3.*, pp. 43-57, 2013.
- [59] C. E. M. UREÑA, «La Cadena Critica como herramienta muy útil en Dirección de Proyectos: Gestión de Proyectos por Cadena Crítica.,» *Escuela Organización Industrial*, 2013.
- [60] M. P. Dieses, «TEOREMA CENTRAL DEL LÍMITE: Un OA para comprender la "normalidad" de la media de muestras grandes,» *Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Informática.*, 2018.