UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

APLICACIÓN DEL MODELO PERT-CPM A LA GESTIÓN DE PROYECTOS

AMPLIACIÓN Y PROFUNDIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA (N)

KARLA EMILIA

VALENCIA RAMÍREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA CDMX AÑO 2025

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **M.A.I. Luis Miguel Muñoz Hernández.**

VOCAL: **Dr. Arturo Rubén Valles Terrazas**

SECRETARIO: **M.A.I. Raúl Valdivieso Martínez**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Oscar de Anda Aguilar**

2° SUPLENTE: **Profesor: Ibet Navarro Reyes**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: SEDE TACUBA, MODALIDAD A DISTANCIA SINCRONICO.

ASESOR DEL TEMA: M.A.I. MIGUEL MUÑOZ HERNANDEZ

_____

SUSTENTANTE (S): KARLA EMILIA VALENCIA RAMIREZ

_____

ÍNDICE

1. **Introducción**:.....2

2. Objetivo 4

2.1. Objetivo General 4

2.2. Objetivos Particulares.....4

3. Hipótesis 4

3.1. Justificación 5

4. Antecedentes: 5

4.1. Producto o Servicio 5

4.2. Descripción del Servicio de Consultoría.....5

4.3. Proyecto 6

4.4. Ciclo de vida de Proyectos 7

4.5. Metodologías de Administración de proyectos 10

4.5.1. Critical Path Method (CPM).....11

4.5.2. Program Evaluation and Review Technique (PERT).....12

4.5.3. Ventajas y limitaciones del modelo PERT-CPM.....12

4.5.4. Crashing 13

4.5.5. Modelo matemático PERT-CPM 14

4.6. Software de administración de Proyectos 19

5. Caso de estudio 19

5.1. Identificación de actividades. 20

5.2. Construcción del diagrama PERT/CPM......22

5.3. Crashing 25

5.4. Análisis de Datos e Interpretación 41

5.5. Conclusiones.....42

6. Bibliografía.....46

Índice de Figuras

Figura 1 Grafico de Administración de Proyectos. 9

Figura 2 Relación tiempo-costo de la actividad, Nazrul, M., & Sharif, M. 14

Figura 3 Distribución de probabilidad Beta, Heizer, J., & Render, B. (2017) pp. 78. 15

Figura 4 Curva Normal, Heizer, J., & Render, B. (2017), pp.80. 17

Figura 5 Red CPM, Elaboración propia. 23

Figura 6 Diagrama de precedencia y ruta crítica, Elaboración propia. 23

Figura 7 Distribución normal z=-0.120, Elaboración propia del Software POM for Windows. 25

Figura 8 Tiempo mínimo y máximo Crashing 1, Elaboración propia del Software POM for Windows 30

Figura 9 Distribución normal z=-3.655, Elaboración propia del Software POM for Windows 31

Figura 10 Distribución normal z=1.164., Elaboración propia del Software POM for Windows 32

Figura 11 Distribución normal z=-3.012, Elaboración propia del Software POM for Windows 35

Figura 12 Distribución normal z=1.807., Elaboración propia del Software POM for Windows 36

Figura 13 Distribución normal z=-2.368, Elaboración propia del Software POM for Windows 39

Figura 14 Distribución normal z=2.45., Elaboración propia del Software POM for Windows 40

Índice de Tablas

Tabla 1 Actividades y tiempo del proyecto, Elaboración propia. 21

Tabla 2 Estimación de tiempos PERT, Elaboración propia. 22

Tabla 3 Costos y tiempos normales y de crashing, Elaboración propia. 26

Tabla 4 Cronograma de Crashing, Elaboración propia. 28

Tabla 5 Estimación de tiempo, varianza y desviación estándar tras aumentó de presupuesto menor a.30,000. 29

Tabla 6 Estimación de tiempo, varianza y desviación estándar tras aumentó de presupuesto por.60,000.. 33

Tabla 7 Estimación de tiempo, varianza y desviación estándar tras aumentó de presupuesto por 90,000.. 37

Tabla 8 Resultados de adición de presupuesto de Crashing, fecha límite 80 días. 41

Tabla 9 Resultados de adición de presupuesto de Crashing, fecha límite 60 días. 42

Título: Aplicación del modelo PERT-CPM a la Gestión de Proyectos

1. **Introducción**:

El presente trabajo se enfoca por abordar la siguiente cuestión ¿Cómo lograr la optimización de tiempos, recursos y costos, mediante la gestión de proyectos con una estrategia unificada e integral mediante su gestión y control?

En el pasado, la planificación de proyectos se realizaba de manera poco estructurada, la herramienta más utilizada en ese entonces era el diagrama de Gantt, que muestra los tiempos de inicio y finalización de cada tarea en un formato de barra horizontal. Sin embargo, este diagrama no permite visualizar las interdependencias entre las distintas actividades, lo que es crucial para el avance del proyecto.

A medida que los proyectos se han vuelto más complejos, ha surgido la necesidad de emplear técnicas de planificación más sistemáticas y efectivas para mejorar la eficiencia en su ejecución.

Se utiliza el enfoque de investigación con las metodologías de PERT y CPM, donde se basa en la determinación de la ruta esencial para la ejecución de las tareas del proyecto que mejora la puntualidad del proyecto, los costos, el control y la ejecución, todo esto para el proyecto de la empresa de consultoría X el cual consiste en el servicio de Calificación del sistema HVAC de una instalación.

Posteriormente se lleva a cabo el crashing del proyecto, con el fin de adicionar presupuesto a las actividades de la ruta crítica y por consecuencia la disminución del tiempo estimado del proyecto, obteniendo un aumento en la probabilidad de la culminación del proyecto en el tiempo programado.

Como resultado del trabajo se muestra la viabilidad de utilizar el método PERT y CPM para aproximaciones probabilísticas que se ajustan a decisiones administrativas del proyecto como: Aceleración en el plazo de cumplimiento o confianza de la planeación establecida.

2. Objetivo

2.1. Objetivo General

Proveer herramientas y aplicación de las metodologías de PERT-CPM que ayuden en la toma de decisiones durante el ciclo de vida del proyecto las cuales permitan gestionar los proyectos de manera más efectiva, reduciendo costos y tiempos, así como buscando que los proyectos cumplan con los estándares de calidad esperados, mejorando la satisfacción del cliente

2.2. Objetivos Particulares

- Presentar los conceptos básicos para el entendimiento de la Dirección de proyectos.
- Investigación de los métodos para la aplicación en la dirección de proyectos.
- Identificar y presentar los comparativos de las diferentes técnicas de administración de proyectos.
- Presentar el uso del método PERT y CPM para la toma de decisiones administrativas.
- Presentar las características del uso del software de gestión.

3. Hipótesis

El uso del método PERT-CPM permite optimizar la toma de decisiones para el tiempo de ejecución, la ruta crítica y los costos de los proyectos.

3.1. Justificación

Dentro de las empresas y las diferentes industrias se manejan proyectos diferentes índoles, en los cuales se muestran atrasos en la planificación, administración y ejecución, motivo por el cual se ha trabajado en el desarrollo de metodologías las cuales permitan lograr llevar una gestión de los proyectos de forma eficiente1 y eficaz2.

4. Antecedentes:

4.1. Producto o Servicio

Los productos o bienes y servicios son el resultado de las actividades que se dan con el fin de satisfacer una necesidad o deseo.

Existen diferencias notorias entre los productos y servicios, los bienes se pueden ver, tocar y almacenarse, son homogéneos, pueden transportarse y su producción y distribución son hechos aislados.

Los servicios no pueden verse, tocarse, almacenarse, son heterogéneos, generalmente son actividades y la producción distribución y consumo pueden ser de forma simultánea.

4.2. Descripción del Servicio de Consultoría

La consultoría es un servicio que se ofrece a la industria u organizaciones el cual tiene como objetivo mejorar la productividad de los empleados, identificar problemas en la unidad estudiada y desarrollar soluciones viables para los mismos dentro de las diversas

[1] Eficiencia: Capacidad de lograr los resultados deseados con el mínimo posible de recursos.
[2] Eficacia: Capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera.

áreas, como estrategia, gestión, finanzas, recursos humanos, tecnología, marketing, y más.

4.3. Proyecto

Con base en la norma técnica NBR 10006, Proyecto es: "Proceso único, consistiendo en un grupo de actividades coordinadas y controladas con fechas para inicio y término, emprendido para alcance de un objetivo conforme requisitos específicos, incluyendo limitaciones de tiempo, costo y recursos."

Y según el PMI un proyecto se define como: "Un emprendimiento temporario, planificado, ejecutado y controlado, con objetivo de crear un producto o servicio único." (3)

De acuerdo con Gavilán et al. (2010) establecen que "Un proyecto es una intervención planificada para responder a una necesidad o problema detectado con la intención de generar una situación final mejor que la situación de partida".

Con base en lo anterior definimos un proyecto como una o un conjunto de unas actividades en un espacio de tiempo temporal y definido que busca alcanzar un objetivo en específico bajo un presupuesto establecido el cual tiene la finalidad de obtener un producto o servicio.

Los proyectos cuentan con las siguientes características:

Temporalidad

Los proyectos tienen características partículas que los distinguen de un trabajo continuo, esta característica es la temporalidad, es decir cuentan con un inicio y un final

establecido, pudiendo ser el final el alcance o no necesariamente el cumplimiento del objetivo planteado inicialmente.

Unicidad

Todo proyecto es único, cada una de las características de los proyectos es singular y estos estas desarrollados en circunstancias particulares y variables distintas, pese a que puedan llegar a compartir características en común entre sí mismo, ningún proyecto es igual a otro.

Objetivos claros

Los proyectos tienen como resultado final un producto o servicio, los cuales provienen de la definición concreta de sus objetivos iniciales, para lograrlo se pueden descomponer en tareas interdependientes entre ellas para lograr una actividad compleja.

Todos los proyectos cuentan con 3 metas universales: 1. Terminar el proyecto en forma oportuna o anticipada. 2. Llevarse a cabo dentro del presupuesto y 3. Cumplir con las características y especificaciones establecidas.

4.4. Ciclo de vida de Proyectos

Un ciclo de vida es la secuencia de eventos desde un origen, hasta la muerte o final, de acuerdo con el Project Management Of Knowledge (PMBOK) el ciclo de vida de un proyecto se compone de 42 procesos, los cuales están agrupados estratégicamente en 5 grupos de procesos (3).

1. Iniciación
2. Planificación

3. Ejecución
4. Seguimiento y Control
5. Cierre

El ciclo de vida otorga el marco con el cual se tenga de referencia para la guía del proyecto y con esto la transición de una fase a otra implica una transferencia y aprobación del trabajo realizado.

De acuerdo con Gavilán et al. (2010) se sugiere que cuando los proyectos se estructuran como herramientas de innovación y aprendizaje con base en la experiencia, se convierten en herramientas para implementar y actualizar la misión de una unidad.

Además, señalan que la gestión de proyectos representa un proceso complejo que incluye:

- Adaptación continúa a realidades cambiantes, interacción con otras personas, situaciones sociales e innovación, identificación de nuevas formas de hacer las cosas para dar respuestas alternativas a los problemas, necesidades y problemas que surgen.
- Ante diferentes momentos o etapas: identificación y maduración de una idea, diseño y reformulación de un proyecto, inicio e implementación de un proyecto, evaluación y terminación

El ciclo de vida de un proyecto da inicio con la identificación de un problema o una situación de mejora.

De acuerdo con Gavilán et al. (2010) ellos mencionan que existen 5 fases durante el ciclo de vida de un proyecto las cuales están relacionadas entre sí, las fases son las siguientes:

1. Fase Inicial, Identificación de la idea.
2. Fase Diseño y Elaboración del proyecto.
3. Fase de puesta en marcha.
4. Fase de Ejecución.
5. Fase final: Ajuste o fin del proyecto.

En otras palabras, podemos redefinir las fases de la administración en 3, dentro de las cuales vienen contenidas sub- actividades con sus características:

1. Planeación: Establecimiento de objetivos, definición del proyecto, Organización del equipo.
2. Programación: Relativo al personal, dinero y proveeduría de las actividades.
3. Control: Monitoreo de recursos, costos, calidad y presupuestos; Revisar los planes de trabajo, tiempo, recursos en pro de cubrir las demandas.

Figura 1 Grafico de Administración de Proyectos.

4.5. Metodologías de Administración de proyectos

La metodología de Red es utilizada para la planificación, esta tiene como característica de ser un conjunto de actividades las cuales se representan de forma ilustrativa mediante un diagrama de red, donde se cuentan con círculos o nodos y flechas de conexión entre los nodos.

Para la elaboración de un diagrama de red, se deben determinar las actividades de los proyectos y con estas actividades también deben definirse las relaciones de precedencia, una relación de precedencia es aquella en donde hay una relación en la cual una actividad sucesora no puede iniciar hasta que se haya concluido una actividad predecesora.

El método de Programa de Evaluación y Revisión de técnica (PERT) y el método de la Ruta crítica (CPM) fueron creadas en los años 50 para facilitar la programación, supervisión y control de proyectos grandes y complejos. El CPM fue el primero en ser desarrollado, específicamente para asistir en la construcción y el mantenimiento de plantas químicas en DuPont. Por su parte, el PERT fue introducido en 1958 por la Marina de los Estados Unidos.

La metodología de PERT-CPM se basa en 6 pasos:

1. Definición del proyecto y estructura de trabajo.
2. Desarrollo de relaciones entre las actividades.
3. Proyección de la red de trabajo.
4. Asignación de tiempo y costos estimados a las actividades.

5. Calculo de la ruta crítica.
6. Uso de la ruta crítica en pro del programa, monitoreo y control.

4.5.1. Critical Path Method (CPM)

El método de la Ruta crítica, es aquella donde se tiene una representación gráfica de las actividades y la unión de estas por medio de flechas para la ejemplificación de la secuencia del proyecto.

La principal característica de los diagramas de red es ilustrar la secuencia y dependencia entre las actividades del proyecto, es decir, mostrar cuando una actividad está condicionada por un antecesor o predecesor.

Otra característica de los diagramas de red es que resultado de la ilustración de las actividades y sus secuencias, es posible identificar la ruta crítica que tiene el proyecto,

Una ruta crítica es aquella línea de actividades con las cuales se puede definir el tiempo de cuándo pueden verse el proyecto terminado, estas actividades de la ruta crítica tienen como característica la holgura cero.

Esta ruta crítica es una secuencia continua dentro de la red del proyecto que pueden caer en las siguientes situaciones:

- Inicia con la primera actividad del proyecto.
- Concluye con la última actividad del proyecto.
- Comprende únicamente las operaciones críticas, es decir, aquellas que no tienen tiempo de holgura.

4.5.2. Program Evaluation and Review Technique (PERT)

El método de PERT es un modelo donde se basa es la descomposición de un objetivo en actividades parciales, estas actividades pueden o no ser sucesivas.

El gráfico PERT tiene como objetivo medir la eficiencia de un proyecto mediante el análisis de las tareas involucradas, el diagrama PERT examina como su variable predominante, el tiempo de ejecución para cada fase de un proyecto.

En consecuencia, después de representar las distintas rutas, se puede calcular la duración requerida, seleccionando la más adecuada.

De acuerdo con TAHA, HAMDY A (2012) Las técnicas de PERT-CPM difieren en que "*CPM asume duraciones de actividad determinísticas y PERT supone duraciones probabilísticas*".

4.5.3. Ventajas y limitaciones del modelo PERT-CPM

El modelo PERT-CPM tiene la capacidad de proporcionar respuestas a ciertos cuestionamientos a lo largo de su implementación, como son:

- Fecha de culminación del proyecto.
- Actividades críticas del proyecto.
- Actividades no críticas.
- Probabilidad de culminar un proyecto en una fecha establecida.
- Visualización del atraso o adelanto del programa.
- Visualización del presupuesto.
- Proyección de los recursos para el término del proyecto.

- Determinación de los costos para término anticipado del proyecto.

Dentro de las limitaciones del modelo se encuentran las siguientes:

- Las actividades del proyecto deben estar claramente definidas desde el inicio de este.
- CPM asume que se tiene conocimiento del tiempo estimado de las actividades y no da margen de variación.

4.5.4. Crashing

El "crashing" es una técnica utilizada para disminuir la duración de un proyecto, esto se logra al reducir el tiempo de una o más actividades críticas por debajo de su duración habitual.

El propósito del crashing es acortar el tiempo del proyecto y aumentar la probabilidad de finalizarlo en o antes de la fecha prevista, invirtiendo fondos adicionales en las actividades de la ruta crítica, pero buscando siempre minimizar los costos asociados a esta reducción.

El crashing implica siempre una inversión adicional de presupuesto, así como el retraso en las actividades de la ruta crítica lleva a un atraso de proyecto, el adelanto o termino de las actividades de la ruta crítica antes de las fechas establecidas llevará al termino del proyecto anticipado, para lograrlo se requeriría la inversión de presupuesto en las actividades de la ruta crítica.

Cada una de las actividades dentro de un proyecto un tiempo estándar o el estimado y asociado a este tiempo hay un costo o presupuesto de la actividad, sin embargo,

cuando se hace el crashing el tiempo y el costo de la actividad cambia, lo que resultaría en un tiempo de crashing y costo de crashing de la actividad.

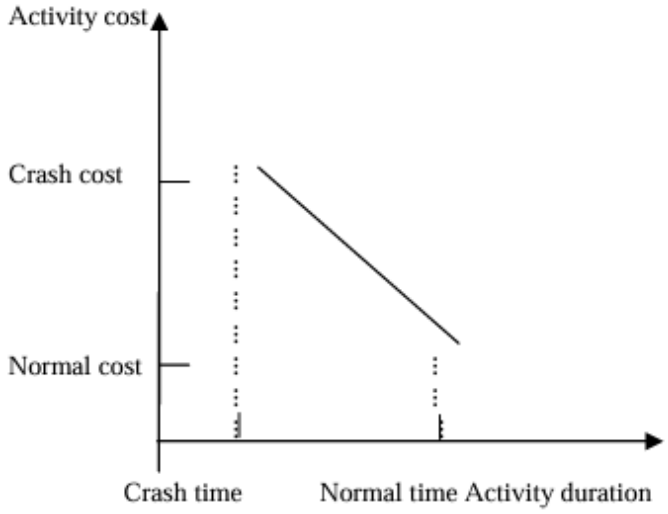

Figura 2 Relación tiempo-costo de la actividad, Nazrul, M., & Sharif, M.

Normalmente, podemos acortar una actividad añadiéndole recursos adicionales, sin embargo, la cantidad en que se puede acortar una actividad depende de la actividad en cuestión ya que se pueden presentar casos donde no sea posible acortar actividades

4.5.5. Modelo matemático PERT-CPM

PERT se basa en el uso de tres estimaciones de tiempo para cada actividad:

1. Optimista (O): El tiempo mínimo que podría tomar.
2. Pesimista (P): El tiempo máximo que podría tomar.
3. Más probable (M): El tiempo que se espera que tome.

Al emplear la metodología PERT, generalmente se asume que las estimaciones del tiempo de las actividades se distribuyen según una probabilidad beta (Figura 2).

Esta distribución continua es comúnmente utilizada para calcular el valor del tiempo esperado y la varianza de los tiempos de finalización de las actividades.

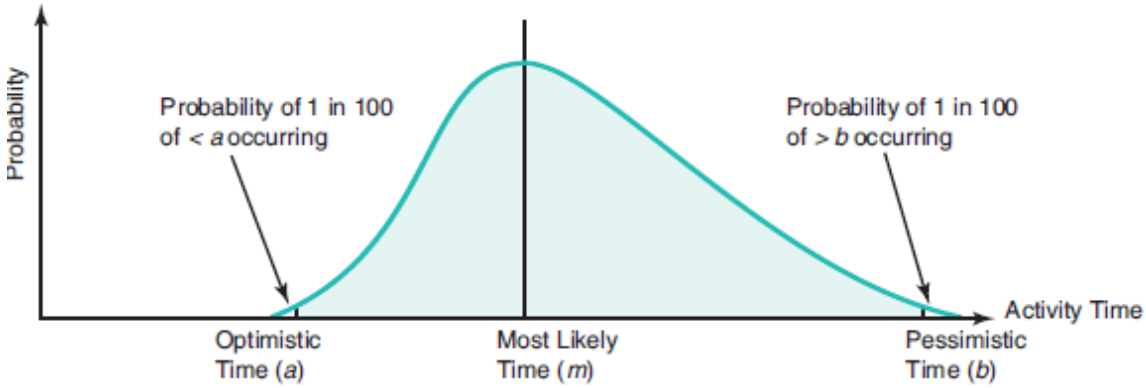

Figura 3 Distribución de probabilidad Beta, Heizer, J., & Render, B. (2017) pp. 78.

El tiempo esperado (T_E) para cada actividad se calcula utilizando la fórmula:

$$(1)\quad T_E = \frac{O + 4M + P}{6}$$

Esto permite calcular la duración media de cada actividad, teniendo en cuenta la variabilidad.

Y de esta forma el T_E del proyecto sería:

$$(2)\quad T_E = \sum_{i=1}^{x} T_E, i = 1, 2, ,3 \ldots . x.$$

Para analizar la incertidumbre, se calcula la varianza (V) de la duración de la actividad:

$$(3)\quad V = \left(\frac{P - O}{6}\right)^2$$

El PERT utiliza la varianza de las actividades del camino crítico para ayudar a determinar la varianza del proyecto global.

La varianza del proyecto se calcula sumando las varianzas de las actividades críticas:

$$(4)\quad Varianza\ del\ proyecto = \sum Varianza\ de\ las\ actividades\ de\ la\ ruta\ critica.$$

La desviación estándar (σ) se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$(5)\quad \sigma = \sqrt{Varianza\ del\ proyecto}$$

De tal forma tenemos que la probabilidad de que un determinado proyecto cumpla un plazo específico puede describirse del siguiente modo

$$(6)\quad Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$(6)\quad Z = \frac{T_F - T_E\ (3)}{\sigma}$$

PERT establece dos suposiciones adicionales:

1. Los tiempos totales de finalización del proyecto se distribuyen normalmente.
2. Los tiempos de las actividades son estadísticamente independientes.

Con base en estas suposiciones, se puede emplear la curva normal en forma de campana, como se ilustra en la Figura 3, para representar las fechas de finalización del proyecto.

Figura 4 Curva Normal, Heizer, J., & Render, B. (2017), pp.80.

Con base en lo que desarrollo Nazrul, M., & Sharif, tenemos lo siguiente

El crashing busca minimizar la duración del Tiempo estimado (T_E) del proyecto, por lo que el Tiempo estimado T_E se transforma Tiempo Estimado de Crashing T_E^*; la desviación estándar σ se convierte en desviación estándar de crashing σ^*y de la misma forma se reduce el tiempo pesimista de las actividades criticas P en tiempo pesimista del crashing $P*$.

Por lo que obtenemos el siguiente modelo matemático:

$$T_E^* = \min. T_E$$

$$T_E^* = \frac{O + 4M + P^*}{6}$$

$$\text{Donde } P^* \leq P$$

Imaginemos que el costo correspondiente a cada actividad del proyecto se denota como C_i donde i representa el número de actividades críticas. Así, la suma total del capital extra que se destinaría debido a la implementación del crashing sería:

$$C_T = \sum_{i=1}^{k} C_i$$

CPM se utiliza para proyectos donde las duraciones de las actividades son conocidas y constantes. Se enfoca en identificar el camino crítico, que es la secuencia más larga de actividades que determina la duración total del proyecto.

Cálculo del Camino Crítico: Para cada actividad, se definen:

1. Duración (D): Tiempo que toma completar la actividad.
2. Tiempo de inicio (ES): El tiempo más temprano en que se puede comenzar la actividad.
3. Tiempo de finalización (EF): Se calcula como:

$$EF = ES + D$$

4. Tiempo de inicio más tardío (LS) y tiempo de finalización más tardío (LF): Permiten determinar la flexibilidad en el inicio y finalización de las actividades.

Cálculo de la Holgura (Slack): La holgura de una actividad se calcula como:

$$Holgura\ (Slack) = LS - ES$$

$$Holgura\ (Slack) = LF - EF$$

Las actividades en el camino crítico tienen holgura cero, lo que significa que cualquier retraso en ellas afectará la duración del proyecto.

4.6. Software de administración de Proyectos

La supervisión de proyectos, al igual que la gestión de cualquier sistema, requiere un seguimiento constante de los recursos, costos, calidad y presupuestos. Este proceso también implica la utilización de un sistema de retroalimentación para evaluar el plan del proyecto y la capacidad de reasignar recursos según sea necesario.

Existen numerosos programas informáticos que generan informes y gráficos PERT/CPM, desarrollados por diversas empresas de software competidoras, entre los más reconocidos se encuentran Oracle Primavera, MindView de MatchWare, HP Project de Hewlett-Packard, Fast Track de AEC Software, Microsoft Project de Microsoft Corp y POM Microsoft, aunque en el mercado existen muchos más.

Para fines del presente trabajo se hará uso de la herramienta POM for Microsoft; POM es un software diseñado para abordar problemas relacionados con operaciones y métodos cuantitativos. Su propósito es apoyar tanto la enseñanza como la aplicación práctica en campos como la investigación de operaciones, gestión de producción y análisis cuantitativo. POM-QM cuenta con una interfaz amigable y ofrece diversas herramientas para modelar, analizar y optimizar procesos empresariales. Sus funciones incluyen programación lineal, simulación, pronósticos y control de calidad, lo que permite tomar decisiones informadas y eficientes tanto en contextos académicos como profesionales.

5. Caso de estudio

Una empresa de consultoría ha sido contratada por parte de la empresa X, para llevar a cabo la calificación de un sistema HVAC en un edificio desde su etapa de Diseño hasta el Desempeño. El proyecto incluye varias fases que requieren personal con diferentes habilidades y niveles de

experiencia a lo largo del tiempo, la empresa de consultoría está encargada de proporcionar el personal de acuerdo a las diferentes fases y requisitos cambiantes.

La consultoría debe planificar las actividades para contar con diversos escenarios debido a la variabilidad de disposición de personal dentro de la empresa y para participar en el proyecto, de esta manera ofrecer al cliente las diversas opciones de tiempos estimados de termino y costos.

5.1. Identificación de actividades.

Actividad	**Descripción**	**Duración (días)**			**Dependencias**
		Optimista (O)	**Más probable (M)**	**Pesimista (P)**	
AC_1	Reunir requisitos del cliente.	1	3	5	NA
AC_2	Definición de los perfiles del personal.	1	2	3	AC_1
AC_3	Realizar un análisis inicial del sistema HVAC	2	3	5	AC_1
AC_4	Asignación de personal para la primera fase	1	1	2	AC_2
AC_5	Redacción de documentos	8	10	15	AC_3, AC_4
AC_6	Aprobación de documentos por parte de cliente	3	5	10	AC_5

Actividad	Descripción	Duración (días)			Dependencias
		Optimista (O)	Más probable (M)	Pesimista (P)	
AC_7	Ejecución Fase 1 (Diseño, Instalación y Operación)	15	20	28	AC_6
AC_8	Asignación de personal para fase II.	1	1	2	AC_2
AC_9	Ejecución Fase 2 (Desempeño)	20	25	35	AC_7
AC_{10}	Monitoreo de desempeño del personal	1	3	5	AC_4, AC_8
AC_{11}	Revisión de calificación por parte de cliente	3	5	10	AC_9
AC_{12}	Atención de comentarios	3	5	10	AC_{11}

Tabla 1 Actividades y tiempo del proyecto, Elaboración propia.

5.2. Construcción del diagrama PERT/CPM.

Actividad	Tiempo de la actividad (Días)	Early Start	Early Finish	Late Start	Late Finish	Slack	Varianza	Desviación estándar
AC_1	3	0	3	0	3	0	0.44	0.67
AC_2	2	3	5	3	5	0	0.11	0.33
AC_3	3.17	3	6.17	3	6.17	0	0.25	0.5
AC_4	1.17	5	6.17	5	6.17	0	0.03	0.17
AC_5	10.5	6.17	16.67	6.17	16.67	0	1.36	1.17
AC_6	5.5	16.67	22.17	16.67	22.17	0	1.36	1.17
AC_7	20.5	22.17	42.67	22.17	42.67	0	4.69	2.17
AC_8	1.17	5	6.17	75.33	76.5	70.33	0.03	0.17
AC_9	25.83	42.67	68.5	42.67	68.5	0	6.25	2.5
AC_{10}	3	6.17	9.17	76.5	79.5	70.33	0.44	0.67
AC_{11}	5.5	68.5	74	68.5	74	0	1.36	1.17
AC_{12}	5.5	74	79.5	74	79.5	0	1.36	1.17
Proyecto	79.5						17.22	4.15

Tabla 2 Estimación de tiempos PERT, Elaboración propia.

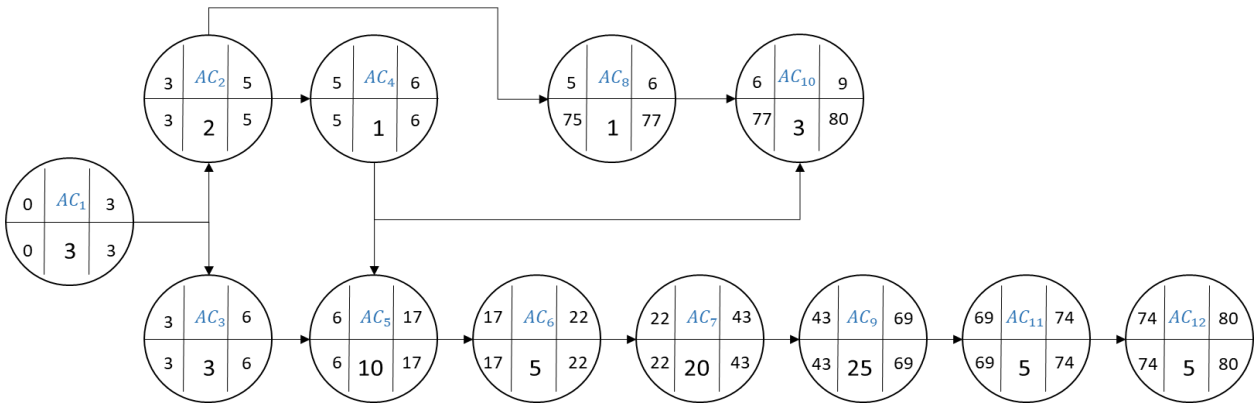

Figura 5 Red CPM, Elaboración propia.

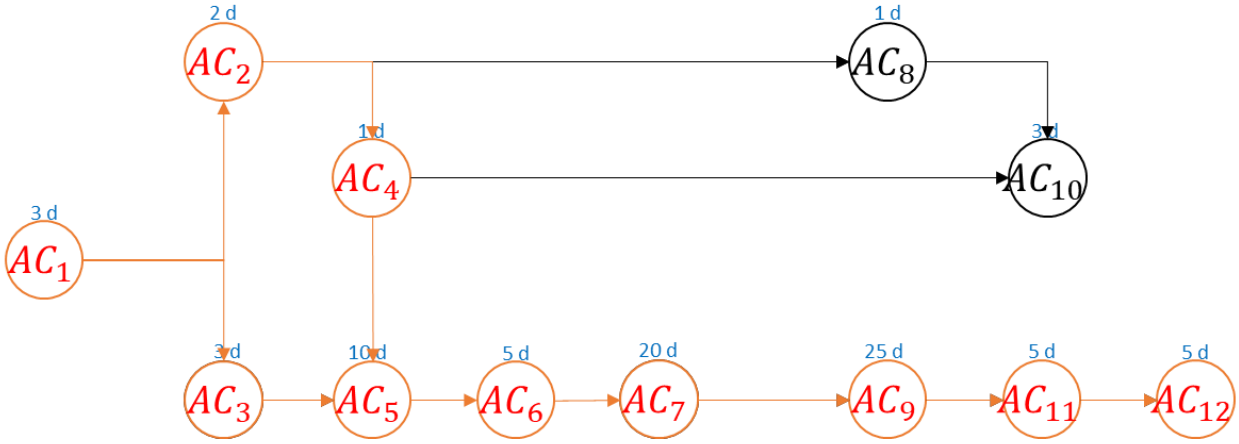

Figura 6 Diagrama de precedencia y ruta crítica, Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la varianza del proyecto se calcula sumando las varianzas de las actividades críticas:

$$Varianza\ del\ proyecto = \sum Varianza\ de\ las\ actividades\ de\ la\ ruta\ critica.$$

$$Varianza = 0.44 + 0.11 + 0.25 + 0.03 + 1.36 + 1.36 + 4.69 + 6.25 + 1.36 + 1.36$$

$$Varianza\ del\ proyecto = \ 17.22$$

La desviación estándar (σ) se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{Varianza\ del\ proyecto}$$

$$\sigma = \sqrt{17.22} = 4.15$$

De tal forma tenemos que la probabilidad de que el proyecto en cuestión cumpla con el plazo de 2.5 meses (80 días), plazo establecido por el estableció el cliente, por lo que la probabilidad puede describirse del siguiente modo

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$z = \frac{80\ días - 79.5\ días}{4.15} = 0.120$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para z = 0.120 la probabilidad es de 0.5478 es decir tenemos el 54.78% de que cumplamos con las actividades en un plazo de 80 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal.

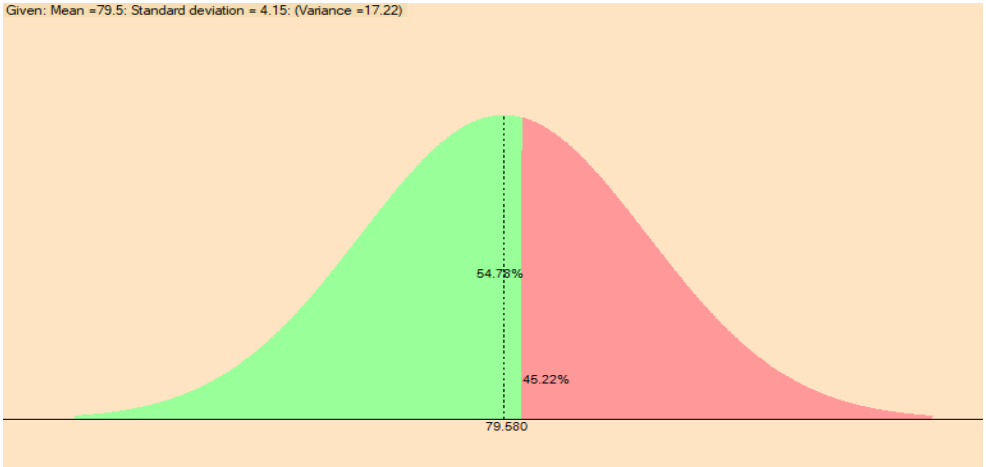

Figura 7 Distribución normal z=-0.120, Elaboración propia del Software POM for Windows.

5.3. Crashing

El cliente solicita que le presenten opciones para que el proyecto pueda concluirse previo al tiempo estimado de culminación dado anteriormente, el objetivo es de 60 días, con la menor inversión adicional.

Ahora bien, tenemos que:

Actividad	**Tiempo Normal (Días)**	**Costo Normal (MX)**	**Tiempo Crash (Días)**	**Costo Crash**	**Costo Crash por día**	**Crash**	**Costo del crashing**
AC_1	3	3,000	2	3,500	500	1	500
AC_2	2	2,000	1	2,500	500	1	500

Actividad	Tiempo Normal (Días)	Costo Normal (MX)	Tiempo Crash (Días)	Costo Crash	Costo Crash por día	Crash	Costo del crashing
AC_3	3.17	4,000	2	7,000	2,571.43	1.17	3,000
AC_4	1.17	1,000	1	1,000	0	.17	0
AC_5	10.5	18,000	8	25,000	2,800	2.5	7,000
AC_6	5.5	NA	5	0	0	.5	0
AC_7	20.5	50,000	15	80,000	5,454.55	5.5	30,000
AC_8	1.17	1,000	1	1,000	0	.17	0
AC_9	25.83	100,000	20	150,000	8.571.43	5.83	50,000
AC_{10}	3	4,000	2	5,000	1,000	0	0
AC_{11}	5.5	NA	5	0	0	.5	0
AC_{12}	5.5	8,000	4	11,000	2,000	1.5	3,000
Proyecto	79.5	191,000					94,000

Tabla 3 Costos y tiempos normales y de crashing, Elaboración propia.

Tiempo de proyecto	Costo del periodo	Costo acumulado	Actividades para Crashing
79.5	0	0	
78.5	0	0	6, 11

Tiempo de proyecto	Costo del periodo	Costo acumulado	Actividades para Crashing
77.5	500	500	1, 11
76.5	1555.55	2055.55	1, 5
75.5	1555.56	3611.11	5
74.5	1555.56	5166.66	5
73.5	1555.56	6722.22	5
72.5	1777.78	8500	5, 12
71.5	2000	10500	12
70.5	2988.09	13488.09	2, 3, 4, 8, 12
69.5	5057.35	18545.44	2, 3, 7
68.5	5454.55	23999.98	7
67.5	5454.55	29454.53	7
66.5	5454.55	34909.07	7
65.5	5454.55	40363.62	7
64.5	6075.38	46439.0	7, 9
63.5	7317.08	53756.08	9
62.5	7317.08	61073.16	9
61.5	7317.08	68390.23	9

Tiempo de proyecto	Costo del periodo	Costo acumulado	Actividades para Crashing
60.5	7317.08	75707.3	9
59.5	7317.08	83024.38	9
58.5	7317.08	90341.46	9
58	3658.54	94000	9

Tabla 4 Cronograma de Crashing, Elaboración propia.

Se contemplan 3 opciones para presentar al cliente con diferentes valores de presupuesto a invertir y el tiempo en el que podría reducirse la entrega, así como la probabilidad de termino.

La inversión de hasta 30,000 adicional al presupuesto nos resulta en lo siguiente:

Actividad	Duración (días)			Tiempo estimado	Varianza	Desviación estándar
	Optimista (O)	Más probable (M)	Pesimista (P)*			
AC_1	1	2*	5	2.33	0.44	0.67
AC_2	1	1*	3	1.33	0.11	0.33
AC_3	2	2*	5	2.5	0.25	0.5
AC_4	1	1*	2	1.17	0.03	0.17
AC_5	8	8*	15	9.17	1.36	1.17
AC_6	3	5*	10	5.5	1.36	1.17
AC_7	15	17.67*	28	18.95	4.69	2.17
AC_8	1	1*	2	1.17	0.03	0.17
AC_9	20	25.83	35	26.39	6.25	2.5
AC_{10}	1	3	5	3	0.44	0.67
AC_{11}	3	5*	10	5.5	1.36	1.17
AC_{12}	3	4*	10	4.83	1.36	1.17
Proyecto				75.17	17.22	4.15

Tabla 5 Estimación de tiempo, varianza y desviación estándar tras aumentó de presupuesto menor a.30,000.

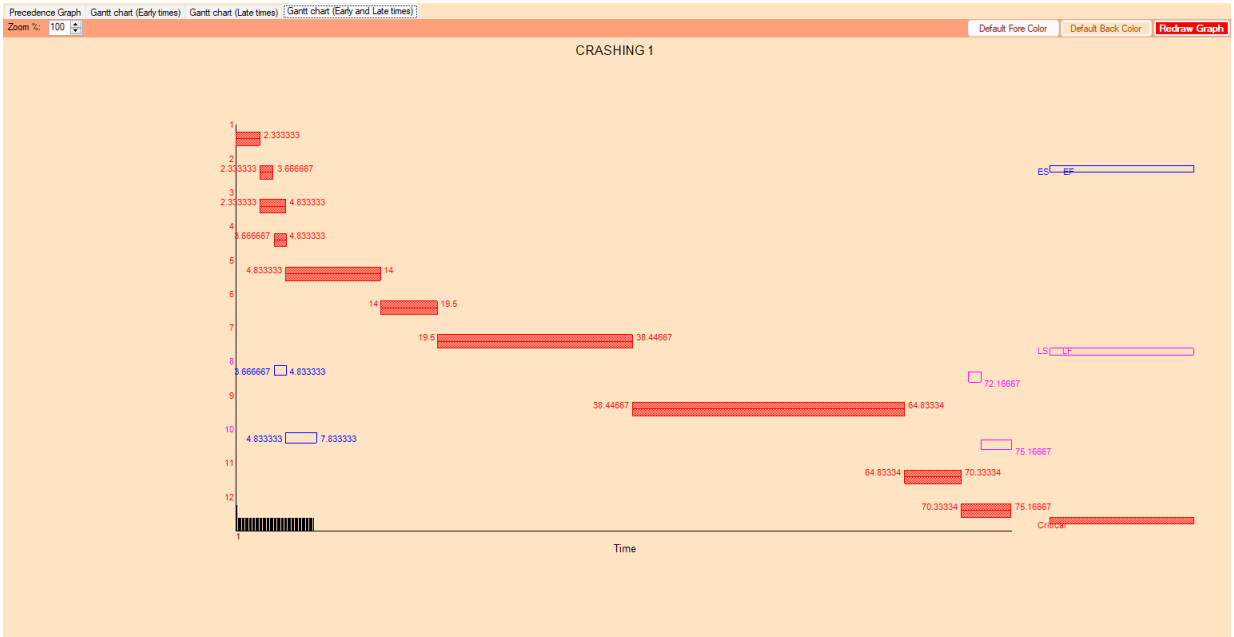

Figura 8 Tiempo mínimo y máximo Crashing 1, Elaboración propia del Software POM for Windows

$$Varianza\ del\ proyecto = \sum Varianza\ de\ las\ actividades\ de\ la\ ruta\ critica.$$

$$Varianza = 0.44 + 0.11 + 0.25 + 0.03 + 1.36 + 1.36 + 4.69 + 6.25 + 1.36 + 1.36$$

$$Varianza = 17.22$$

La desviación estándar (σ) se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{Varianza\ del\ proyecto}$$

$$\sigma = \sqrt{17.22}$$

$$\sigma = 4.15$$

De tal forma tenemos que la probabilidad de que el proyecto en cuestión cumpla con el plazo reducido de 2 meses (60 días) el cual estableció el cliente, por lo que la probabilidad puede describirse del siguiente modo

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$z = \frac{60\ días - 75.17\ días}{4.15} = -3.655$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para Z=-3.655 la probabilidad es de 0.9999 es decir tenemos el menos del 0.1% de que cumplamos con las actividades en un plazo reducido de 60 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal.

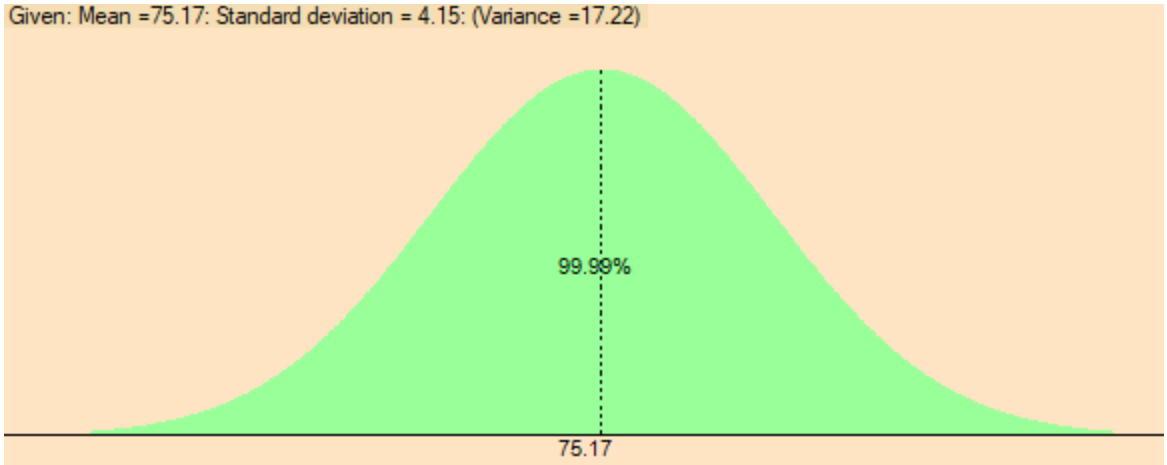

Figura 9 Distribución normal z=-3.655, Elaboración propia del Software POM for Windows

Sin embargo, si obtenemos la probabilidad de terminar en el tiempo inicial establecido, 80 días, obtenemos que:

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$z = \frac{80\ días - 75.17\ días}{4.15} = 1.164$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para Z=1.164 la probabilidad es de 0.8770 es decir tenemos el 87.7% de que cumplamos con las actividades en el plazo inicial de 80 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal:

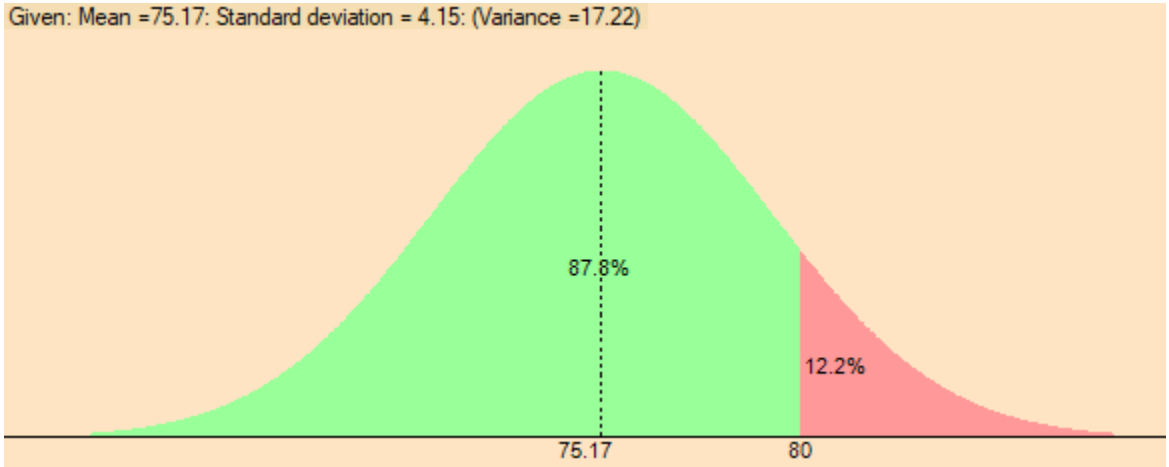

Figura 10 Distribución normal z=1.164., Elaboración propia del Software POM for Windows

La inversión de hasta 60,000 adicional al presupuesto nos resulta en lo siguiente:

Actividad	**Duración (días)**			**Tiempo estimado**	**Varianza**	**Desviación estándar**
	Optimista (O)	**Más probable (M)**	**Pesimista (P)***			
AC_1	1	2*	5	2.33	0.44	0.67
AC_2	1	1*	3	1.33	0.11	0.33
AC_3	2	2*	5	2.5	0.25	0.5
AC_4	1	1*	2	1.17	0.03	0.17
AC_5	8	8*	15	9.17	1.36	1.17
AC_6	3	5*	10	5.5	1.36	1.17
AC_7	15	15*	28	17.17	4.69	2.17
AC_8	1	1*	2	1.17	0.03	0.17
AC_9	20	24.5*	35	25.5	6.25	2.5
AC_{10}	1	3	5	3	0.44	.67
AC_{11}	3	5*	10	5.5	1.36	1.17
AC_{12}	3	4*	10	4.83	1.36	1.17
Proyecto				72.5	17.22	4.15

Tabla 6 Estimación de tiempo, varianza y desviación estándar tras aumentó de presupuesto por.60,000.

$$Varianza\ del\ proyecto = \sum Varianza\ de\ las\ actividades\ de\ la\ ruta\ critica.$$

$$Varianza = 0.44 + 0.11 + 0.25 + 0.03 + 1.36 + 1.36 + 4.69 + 6.25 + 1.36 + 1.36$$

$$Varianza\ del\ proyecto = \ 17.22$$

La desviación estándar (σ) se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{Varianza\ del\ proyecto}$$

$$\sigma = \sqrt{17.22}$$

$$\sigma = 4.15$$

De tal forma tenemos que la probabilidad de que el proyecto en cuestión cumpla con el plazo reducido de 2 meses (60 días) el cual estableció el cliente, por lo que la probabilidad puede describirse del siguiente modo:

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$Z = \frac{60\ días - \ 72.5\ días}{4.15} = -3.012$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para Z=-3.012 la probabilidad es de 0.9987 es decir tenemos el 0.13% de que cumplamos con las actividades en un plazo de 60 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal.

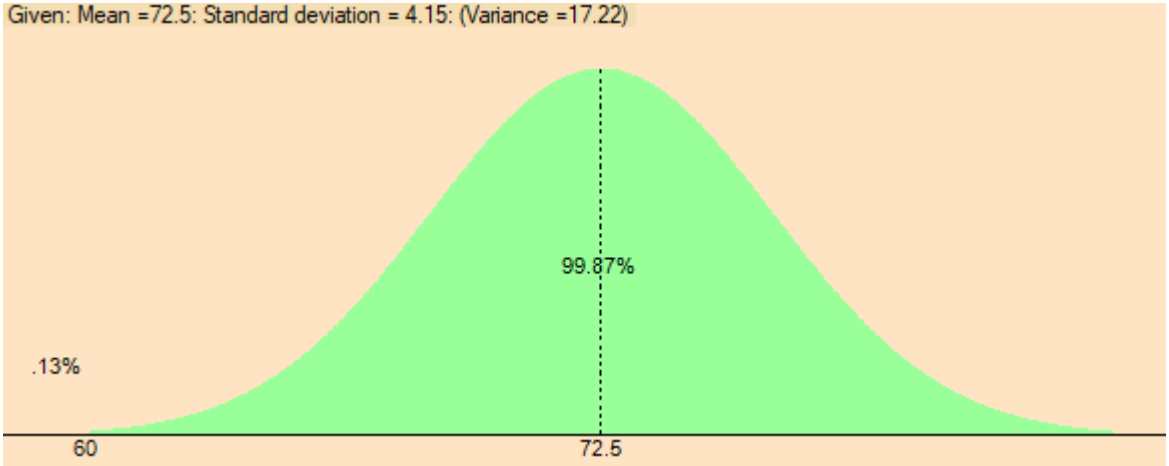

Figura 11 Distribución normal z=-3.012, Elaboración propia del Software POM for Windows

Sin embargo, si obtenemos la probabilidad de terminar en el tiempo inicial establecido, 80 días, obtenemos que:

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$z = \frac{80\ días - 72.5\ días}{4.15} = 1.807$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para Z=1.807 la probabilidad es de 0.9646 es decir tenemos el 96% de que cumplamos con las actividades en el plazo inicial de 80 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal

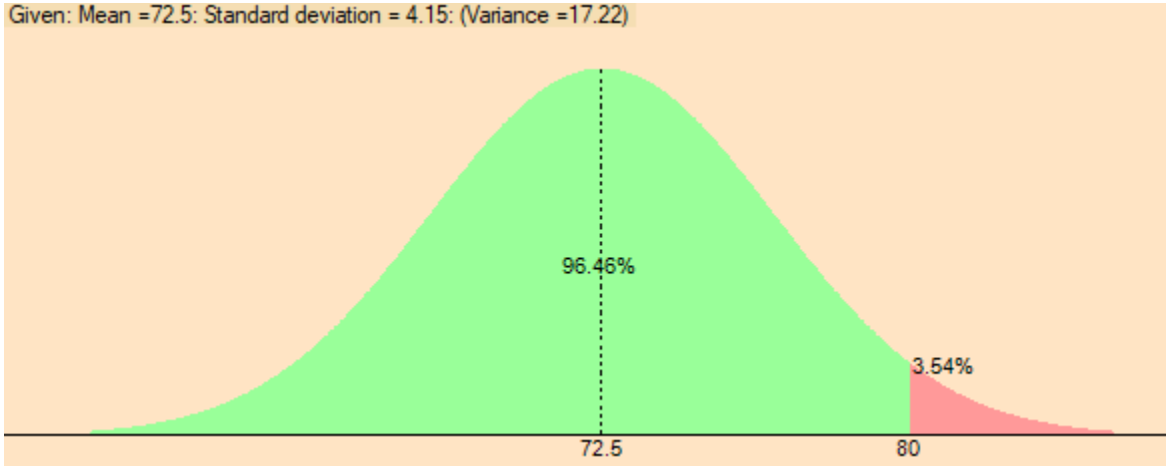

Figura 12 Distribución normal z=1.807., Elaboración propia del Software POM for Windows

La inversión de hasta 90,000 adicional al presupuesto nos resulta en lo siguiente:

Actividad	Duración (días)			Tiempo estimado	Varianza	Desviación estándar
	Optimista (O)	Más probable (M)	Pesimista (P)*			
AC_1	1	2*	5	2.33	0.44	0.67
AC_2	1	1*	3	1.33	0.11	0.33
AC_3	2	2*	5	2.5	0.25	0.5
AC_4	1	1*	2	1.17	0.03	0.17
AC_5	8	8*	15	9.17	1.36	1.17
AC_6	3	5*	10	5.5	1.36	1.17
AC_7	15	15*	28	17.17	4.69	2.17
AC_8	1	1*	2	1.17	0.03	0.17
AC_9	20	20.5*	35	22.83	6.25	2.5
AC_{10}	1	3	5	3	0.44	0.67
AC_{11}	3	5*	10	5.5	1.36	1.17
AC_{12}	3	4*	10	4.83	1.36	1.17
Proyecto				69.83	17.22	4.15

Tabla 7 Estimación de tiempo, varianza y desviación estándar tras aumentó de presupuesto por 90,000.

$$Varianza\ del\ proyecto = \sum Varianza\ de\ las\ actividades\ de\ la\ ruta\ critica.$$

$$Varianza = 0.44 + 0.11 + 0.25 + 0.03 + 1.36 + 1.36 + 4.69 + 6.25 + 1.36 + 1.36$$

$$Varianza\ del\ proyecto = \ 17.22$$

La desviación estándar (σ) se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{Varianza\ del\ proyecto}$$

$$\sigma = \sqrt{17.22}$$

$$\sigma = 4.15$$

De tal forma tenemos que la probabilidad de que el proyecto en cuestión cumpla con el plazo reducido de 2 meses (60 días) el cual estableció el cliente, por lo que la probabilidad puede describirse del siguiente modo:

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$Z = \frac{60\ días - \ 69.83\ días}{4.15} = -2.368$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para Z=-2.368 la probabilidad es de 0.9911 es decir tenemos el 0.89% de que cumplamos con las actividades en un plazo de 60 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal.

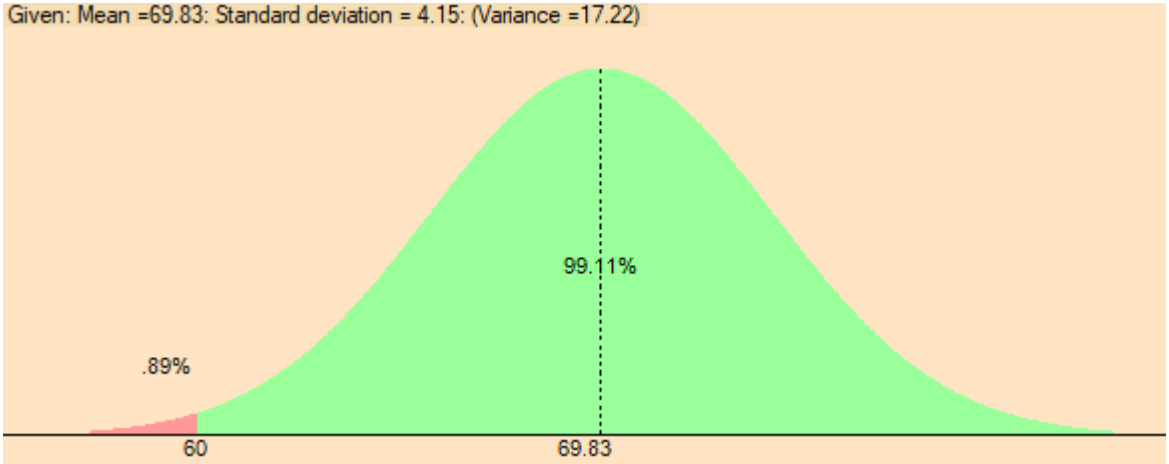

Figura 13 Distribución normal z=-2.368, Elaboración propia del Software POM for Windows

Sin embargo, si obtenemos la probabilidad de terminar en el tiempo inicial establecido, 80 días, obtenemos que:

$$Z = \frac{Fecha\ limite\ (T_F) - Tiempo\ estimada\ de\ termino}{Desviación\ estandar\ del\ proyecto}$$

$$z = \frac{80\ días - 69.83\ días}{4.15} = 2.45$$

Proveniente de las tablas de distribución normal se encuentra que para Z=2.45 la probabilidad es de 0.9929 es decir tenemos el 99% de que cumplamos con las actividades en el plazo inicial de 80 días.

A continuación, tenemos la figura que representa el cálculo de la distribución normal

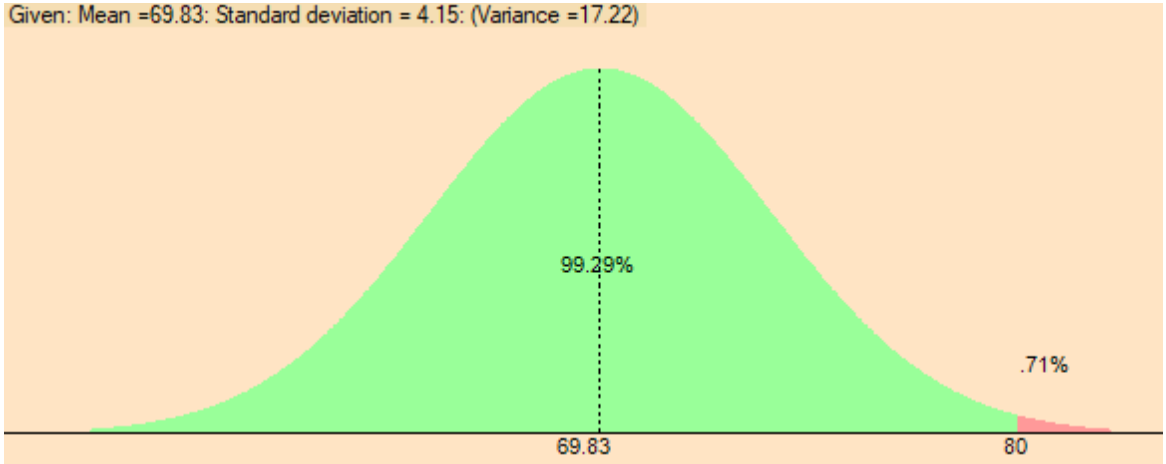

Figura 14 Distribución normal z=2.45., Elaboración propia del Software POM for Windows

5.4. Análisis de Datos e Interpretación

Como resultado de lo anterior se condensa de la siguiente manera para un término de proyecto en 80 días:

No.	Costo Crashing	Desviación Estándar	Tiempo Estimado	Z	%
1	0	4.15	79.5	0.120	54.78
2	29,454.53	4.15	75.17	1.164	87.7
3	53,756.08	4.15	72.5	1.807	96
4	83,024.38	4.15	69.83	2.45	99.29

Tabla 8 Resultados de adición de presupuesto de Crashing, fecha límite 80 días.

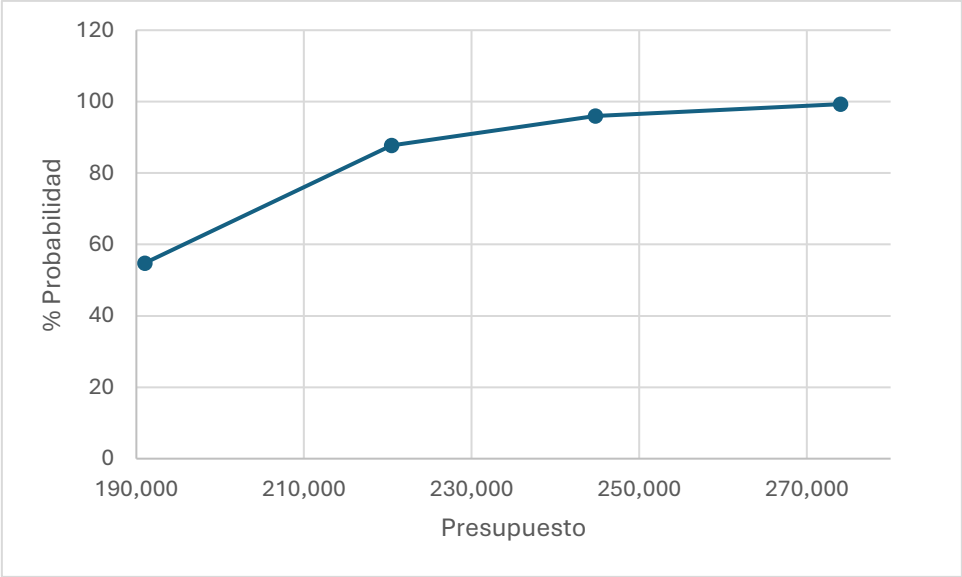

Figura 15. Grafica de % de probabilidad vs presupuesto con Crashing.

Como resultado de lo anterior se condensa de la siguiente manera para un término de proyecto en 60 días:

No.	Costo Crashing	Desviación Estándar	Tiempo Estimado	Z	%
1	0	4.15	79.5	0.120	
2	29,454.53	4.15	75.17	-3.655	0.001
3	53,756.08	4.15	72.5	-3.012	0.13
4	83,024.38	4.15	69.83	-2.368	0.89

Tabla 9 Resultados de adición de presupuesto de Crashing, fecha límite 60 días.

5.5. Conclusiones

El modelo matemático del método PERT-CPM se desarrolla mediante la creación de un diagrama de la red del proyecto, siguiendo las especificaciones de secuencia y duración de las actividades. A partir de ahí, se determina el tiempo total del proyecto y se identifica la ruta crítica. Se asignan los recursos y costos necesarios para elaborar el presupuesto y el cronograma de ejecución, buscando así optimizar la relación entre tiempo y costo.

La versatilidad de este método permite realizar simulaciones probabilísticas que se adaptan a decisiones administrativas, como la aceleración de plazos o ajustes en la confianza del cronograma. Sin embargo, es importante considerar que acortar los tiempos de finalización suele conllevar un aumento en los costos. Este proceso se simplifica y automatiza a través de herramientas de software.

Además, el presente trabajo confirma que el método PERT-CPM facilita la optimización de tiempos, recursos y costos en la gestión de proyectos en la industria, proporcionando una visión integral de las actividades, lo que mejora su administración y control.

Partimos de un presupuesto inicial de $191,000 con una fecha límite de 80 días y con el desarrollo de la metodología obtenemos un valor de tiempo de actividades en 79.5 días y una probabilidad de cumplimiento de 54.78%.

Al agregar presupuesto adicional para visibilizar el comportamiento del proyecto y mostrar las reducciones en tiempo para la fecha límite de 80 días, conforme se adicionaba presupuesto obtuvimos lo siguiente:

1.- Presupuesto adicionado: 29,454.53= 220,454.53, Tiempo estimado de 75.17 y una probabilidad de 87.7%.

2.- Presupuesto adicionado: 53,756.08= 244,756.08, Tiempo estimado de 72.5 y una probabilidad de 96%.

3.- Presupuesto adicionado: 83,024.38= 274,024.38, tiempo estimado de 69.83 días y una probabilidad de 99%.

El modelo PERT-CPM no solo proporciona herramientas cuantitativas para la gestión, sino que también facilita la toma de decisiones basadas en datos objetivos, lo que incrementa las probabilidades de éxito en los proyectos, por ello que para el caso de estudio del presente trabajo el análisis muestra una clara relación entre el presupuesto adicional y la reducción en el tiempo estimado para la finalización del proyecto, así como un aumento significativo en la probabilidad de cumplir con la fecha límite.

A medida que se incrementa el presupuesto, no solo se reduce el tiempo necesario para completar el proyecto, sino que también aumenta considerablemente la certeza del cumplimiento de los plazos.

Si el objetivo es optimizar el tiempo al menor costo posible, la Opción 1 (Presupuesto Adicional: $29,454.53) parece resulta la mejor alternativa ya que el incremento de presupuesto es moderado en comparación con las otras opciones y la reducción en el tiempo es significativa, de 79.5 días a 75.17 días, lo que mejora el cumplimiento de la fecha límite, así como la probabilidad de cumplimiento sube considerablemente a 87.7%, lo que reduce de forma notable el riesgo.

Por otro lado, aunque la Opción 3 ofrece el menor tiempo (69.83 días), el incremento de presupuesto es considerable (más de $83,000 adicionales), lo que podría ser innecesario si el objetivo principal es mantener los costos bajos.

A lo largo del desarrollo de este trabajo y con el apoyo del estudio de caso, se alcanzó el objetivo establecido al inicio: se presentaron las estrategias necesarias para optimizar el tiempo de ejecución, identificando la ruta crítica y los costos vinculados al préstamo de servicio proporcionado para las actividades de calificación de HVAC de la empresa cliente. Este enfoque permitió no solo mejorar la eficiencia en los plazos, sino también proporcionar una visión integral de los recursos requeridos, presentando la mejor alternativa basada en datos asegurando un balance adecuado entre tiempo, costo en la gestión del proyecto.

Este trabajo ha sido el resultado directo de los conocimientos adquiridos durante el diplomado, el cual me proporcionó una base sólida en herramientas y metodologías esenciales para la gestión de proyectos, especialmente en el uso de los modelos PERT y

CPM, donde gracias a la formación recibida, pude aplicar estos conceptos a un caso práctico real, lo que me permitió obtener una comprensión más profunda sobre cómo optimizar los tiempos de ejecución, identificar la ruta crítica y gestionar de manera eficiente los costos asociados al proyecto.

Las técnicas y enfoques aprendidos durante el diplomado fueron clave para gestionar de forma efectiva este proyecto, permitiéndome aplicar los principios de planificación, control y toma de decisiones dentro de un entorno real de trabajo.

Este trabajo no solo refleja la aplicación de los conocimientos adquiridos, sino también cómo una formación especializada en gestión de proyectos contribuye de manera significativa a la mejora de los resultados.

Bibliografía

1. (S/f-a). Rae.es. Recuperado el 16 de octubre de 2024, de https://dle.rae.es/eficiencia?m=form

2. (S/f-b). Rae.es. Recuperado el 16 de octubre de 2024, de https://dle.rae.es/eficacia?m=form

3. Project Management Institute, Inc. (2017). Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Sixth Edición (SPANISH).

4. Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK®), Cuarta Edición, Project Management Institute, Inc, 2008, página 6.

5. Gavilán, B., Massa, I., Guezuraga, N., Bergara, A., & López Arostegui, R. (2010). Guía para la gestión de proyecto sociales. Equipo del Observatorio del Tercer Sector de Bizkaia. https://planificacionsocialunsj.files.wordpress.com/2018/05/guiagestic3b3n-proyectos-sociales.pdf

6. Terrazas Pastor Rafael, Planificación y programación de operaciones. PERSPECTIVAS [en línea]. 2011, (28), 7-32[fecha de Consulta 19 de octubre de 2024]. ISSN: 1994-3733. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=425941257002

7. Arias, E. R. (2022, 24 noviembre). Diagrama CPM Qué es, definición y concepto. Economipedia. https://economipedia.com/definiciones/diagrama-cpm.html

8. Arias, E. R. (2022b, noviembre 24). Diagrama PERT Qué es, definición y concepto. Economipedia. https://economipedia.com/definiciones/diagrama-pert.html

9. TAHA, HAMDY A.; Investigación de operaciones, Novena edición, PEARSON EDUCACIÓN, México, 2012

10. Santiago de la Fuente Fernández, Gestión de ´proyectos Redes PERT, CPM, Técnicas de evaluación y revisión de proyectos, Instrumentos Estadísticos Avanzados, Facultad Ciencias Económicas y Empresariales, Departamento de Economía Aplicada, Universidad autónoma de Madrid, Disponible en: https://www.estadistica.net/IO/6-1-PERT-CPM.pdf

11. Heizer, J., & Render, B. (2017). Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management. Prentice Hall, PEARSON, 12TH Edición.

12. Nazrul, M., & Sharif, M. (s/f). Project completion probability after crashing pert/cpm network. Msdjournal.org. Recuperado el 27 de octubre de 2024, de https://msdjournal.org/wp-content/uploads/vol4issue1-14.pdf.