



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

ING. QUÍMICA – INGENIERIA Y ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL CONTROL DE PROYECTOS

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Marcos Martínez Ortega

TUTOR PRINCIPAL

Mariano Antonio García Martínez, Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

Octubre 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: MBA. Guinea Corres Elisa.  
Secretario: M. en I. Ortiz Ramírez José Antonio.  
Vocal: I. Q. Monterrubio Chavolla Olga Marta.  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Cruz Gómez Modesto Javier.  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. García Martínez Mariano Antonio.

Facultad de Química, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

García Martínez Mariano Antonio

-----  
**FIRMA**

## Índice

Abreviaturas.....	5
1. Introducción.....	7
1.1    Objetivos.....	9
1.1.1    Objetivo General.....	9
1.1.2    Objetivos Particulares.....	9
1.2    Justificación.....	10
2. Antecedentes.....	16
2.1    Proyectos y la Administración de Proyectos.....	16
2.2    Planeación.....	18
2.3    Control.....	19
2.3.1    Método de la ruta crítica (CPM).....	21
2.3.1.1    Método de cálculo AON (Activity on Node).....	22
2.3.2    Método de la cadena crítica (CCM).....	27
2.3.2.1    Dimensionamiento de Buffers.....	30
2.3.3    Método Montecarlo.....	44
2.3.3.1    Distribuciones de probabilidad.....	46
2.3.3.1.1    Distribución triangular.....	46
2.3.3.1.2    Distribución normal.....	47
2.3.3.1.3    Distribución logarítmica.....	47
2.3.3.1.4    Distribución BetaPERT.....	48
2.3.3.2    Proceso de simulación.....	48
3. Caso de Estudio.....	55
3.1    Antecedentes del caso de estudio.....	55
3.1.1    Plataformas Marinas.....	55
3.1.1.1    Plataformas tipo Jacket.....	57
3.2    Definición del caso de estudio.....	59
3.2.1    Ingeniería básica.....	61
3.2.2    Programa resumido del proyecto.....	67

3.2.3	Programa detallado del proyecto.....	68
3.2.4	Riesgos.....	71
3.2.4.1	Riesgos para la evaluación.....	73
3.3	Aplicación del método de Cadena crítica.....	80
3.3.1	Generalidades.....	80
3.3.2	Dimensionamiento de buffers.....	81
3.3.2.1	Dimensionamiento de buffers método 50%.....	81
3.3.2.2	Dimensionamiento de buffers método RSEM.....	82
3.3.2.3	Dimensionamiento de buffers método APRT.....	83
3.3.2.4	Dimensionamiento de buffers método APD.....	86
3.4	Aplicación del método de Simulación Montecarlo.....	87
3.4.1	Generalidades.....	87
3.4.2	Simulación Montecarlo.....	88
3.4.2.1	Simulación Montecarlo: método de la ruta crítica....	88
3.4.2.2	Simulación Montecarlo: método de la cadena crítica.....	89
4.	Resultados y Discusión.....	90
4.1	Programa del proyecto ruta crítica.....	90
4.2	Programa del proyecto método de la cadena crítica.....	91
4.2.1	Programa del proyecto método de la cadena crítica dimensionamiento "50%".....	92
4.2.2	Programa del proyecto método de la cadena crítica dimensionamiento "RSEM".....	94
4.2.3	Programa del proyecto método de la cadena crítica dimensionamiento "APRT".....	95
4.2.4	Programa del proyecto método de la cadena crítica dimensionamiento "APD".....	97
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	99
6.	Bibliografía.....	101
7.	Apéndices.....	106

## Abreviaturas

AON.....	Activity on Node.
APD.....	Adaptative Procedure with Density.
APRT.....	Adaptative Procedure with Resource Tightness.
B <sub>A</sub> .....	Buffer de Alimentación.
B <sub>P</sub> .....	Buffer del Proyecto.
CCM.....	Critical Chain Method.
CPM.....	Critical Path Method.
D <sub>i,n</sub> .....	Disponibilidad del recurso n en la cadena i.
D <sub>Max,j</sub> .....	Disponibilidad máxima de los recursos en la cadena i.
d <sub>i</sub> .....	Promedio de la duración de la tarea i.
DA <sub>i</sub> .....	Duración de la actividad i.
DR <sub>i</sub> .....	Demanda de recursos de la actividad i.
EF.....	Early Finish.
ES.....	Early Start.
F <sub>i</sub> .....	Factor de disponibilidad del recurso n en la cadena i.
FF.....	Free Float.
IMP.....	Instituto Mexicano del Petróleo
k <sub>i</sub> .....	Factor de densidad de la cadena i.
LF.....	Late Finish
LS.....	Late Start
N <sub>p</sub> <sub>i</sub> .....	Número total de relaciones de precedencia.

NT<sub>i</sub>.....Número total de actividades de la cadena i.

NTR.....Non-Technical Risks.

PERT.....Project Evaluation and Review Techniques.

PMI.....Project Management Institute.

RSEM.....Root Square Error Method.

RBS.....Risk Breakdown Structure.

Si.....Duración de seguridad de la tarea i.

TD.....Trabajo disponible.

TF.....Total Float.

TR<sub>i,n</sub>.....Trabajo requerido para la actividad i del recurso n.

U<sub>i</sub>.....Incertidumbre asociada a la tarea.

WBS.....Work Breakdown Structure.

β<sub>i</sub>.....Coeficiente de complejidad de la cadena i.

σ<sub>i</sub>.....Desviación estándar de la cadena i.

## **1. Introducción**

El control como herramienta fundamental de la administración de los proyectos ha mostrado su capacidad para responder a las necesidades cambiantes de las industrias modernas permitiendo a los gerentes de proyecto comparar el trabajo realizado contra las expectativas establecidas, conocer el estado actual del trabajo realizado y administrar los cambios en caso de ser necesario. Tal es su importancia que se han desarrollado herramientas específicas para el control del tiempo de las actividades de un proyecto, las cuales se han modificado a lo largo de la historia conforme la evolución de las industrias.

La elección y/o diseño de una herramienta específica para el control del tiempo en los proyectos requiere de información actualizada y accesible debido al constante incremento de la velocidad y dinamismo de los proyectos, como prueba de esto encontramos un gran número de técnicas y artículos especializados en este campo.

Por su parte los métodos estadísticos para el control del tiempo en los proyectos representan una herramienta con la que se puede abarcar un amplio rango de variables existentes en la ejecución de las actividades propias del proyecto. Sin embargo, el alto índice de competencia y confidencialidad representan un obstáculo para la correcta elección del método de control.

Por esto, el desarrollo de investigaciones, como la que en este documento se presenta, es de gran importancia para la correcta estructuración de investigaciones y aplicaciones futuras con posible aplicación en áreas emergentes.

Los principales objetivos de esta investigación se enfocan en el análisis y desglose de dos metodologías (Cadena crítica y método Montecarlo) de control del tiempo en los proyectos para evaluar su posible efectividad



como métodos para el control del tiempo, las cuales pueden ser extrapolables debido a la naturaleza de los métodos y a los comportamientos similares entre proyectos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Evaluar el programa del proyecto de la ingeniería básica de la construcción de una plataforma marina de producción tipo tetrápodo haciendo uso de los métodos estadísticos de cadena crítica y simulación Montecarlo enfocados en el control del tiempo.

### **1.1.2 Objetivos Particulares**

- Establecer rutas efectivas para la correcta aplicación de los métodos de cadena crítica y simulación Montecarlo paso a paso.
- Aplicar los métodos de cadena crítica y simulación Montecarlo en la evaluación un caso de estudio.
- Realizar un análisis comparativo entre los distintos métodos de dimensionamiento de buffers.
- Establecer un análisis de la combinación entre los métodos de cadena crítica y simulación Montecarlo.
- Comparar la combinación cadena crítica-Montecarlo con su similar ruta crítica-Montecarlo.
- Proponer alternativas al programa conforme a los resultados obtenidos de la evaluación mediante los métodos de cadena crítica y simulación Montecarlo.

## **1.2 Justificación**

Los riesgos de proyecto son eventos o condiciones que en el caso de ocurrir tendrán un efecto positivo o negativo en uno o más de los atributos del proyecto (alcance, el costo, el cronograma y la calidad).<sup>1</sup> En la actualidad, los proyectos se comportan de forma altamente dinámica por lo que la probabilidad de ocurrencia de los riesgos aumenta, debido a esto, es de suma importancia hacer uso de métodos estadístico para el control de los proyectos ya que su uso permite a los gerentes tener una visión adaptativa para la toma de decisiones. Además de dar la posibilidad de modelar y diseñar mejores estrategias, para cada uno de los posibles escenarios que enfrentará el proyecto, aumentando así las probabilidades de ocurrencia de cada una de las situaciones favorables para el proyecto y por lo tanto el éxito del mismo.<sup>2</sup>

Como prueba del creciente incremento en los riesgos se tiene que a nivel mundial únicamente el 70% de los proyectos logran alcanzar sus objetivos, llegando a perder cerca de cien millones de dólares por cada billón de dólares invertido, sin mencionar que los proyectos grandes tienen el doble de probabilidad de sufrir retrasos y sobrecostos.<sup>3,4.</sup>

Este amplio nivel de fracaso puede deberse a un mal manejo de la administración de riesgos o a la inexistencia de un plan de administración de los mismos. En consultas, realizadas por Wellington PPM Intelligence a gerentes de proyecto de más de 300 empresas de diversos sectores, se ha mostrado que existe más de un 30% de los proyectos que no tiene como costumbre el manejo de una administración de riesgos al momento de ejecutar un proyecto y que únicamente el 48% de los gerentes usan de forma habitual una línea base que representa el programa del proyecto con la cual puede ser monitoreado el estado real del avance del proyecto,

lo que en conjunto puede incrementar de sobremanera las probabilidades del fracaso del proyecto (véase figuras 1 y 2).<sup>5</sup>

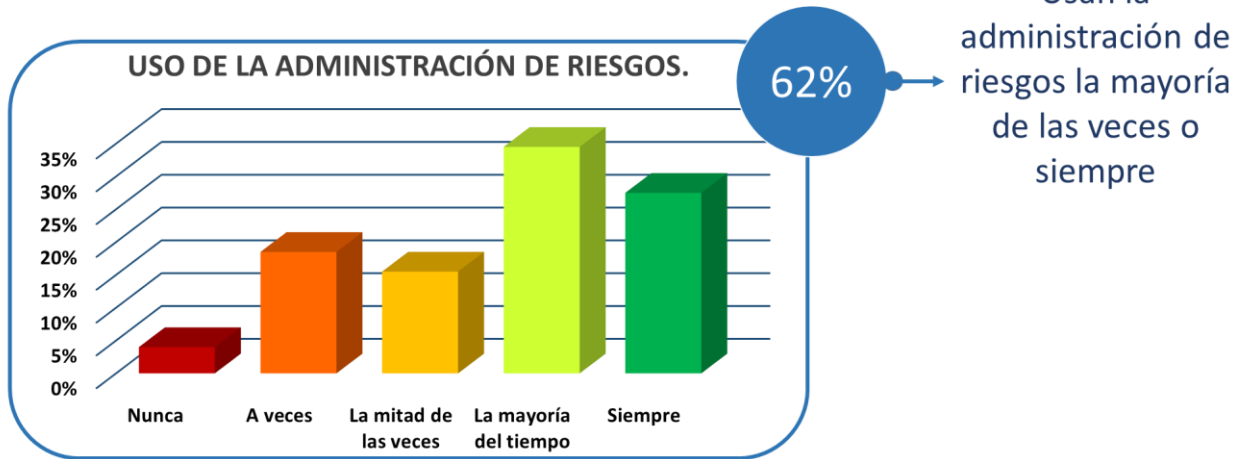


Figura 1. Uso de la administración de riesgos.

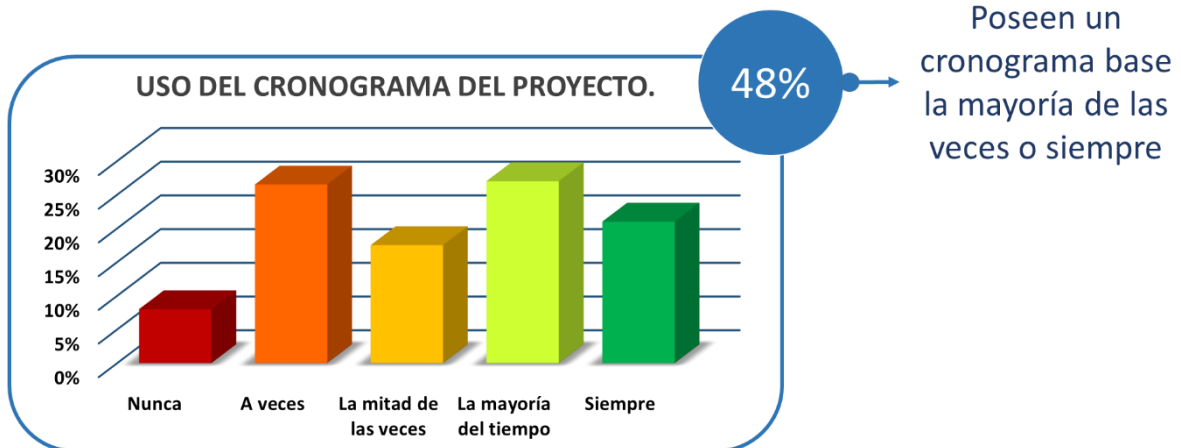
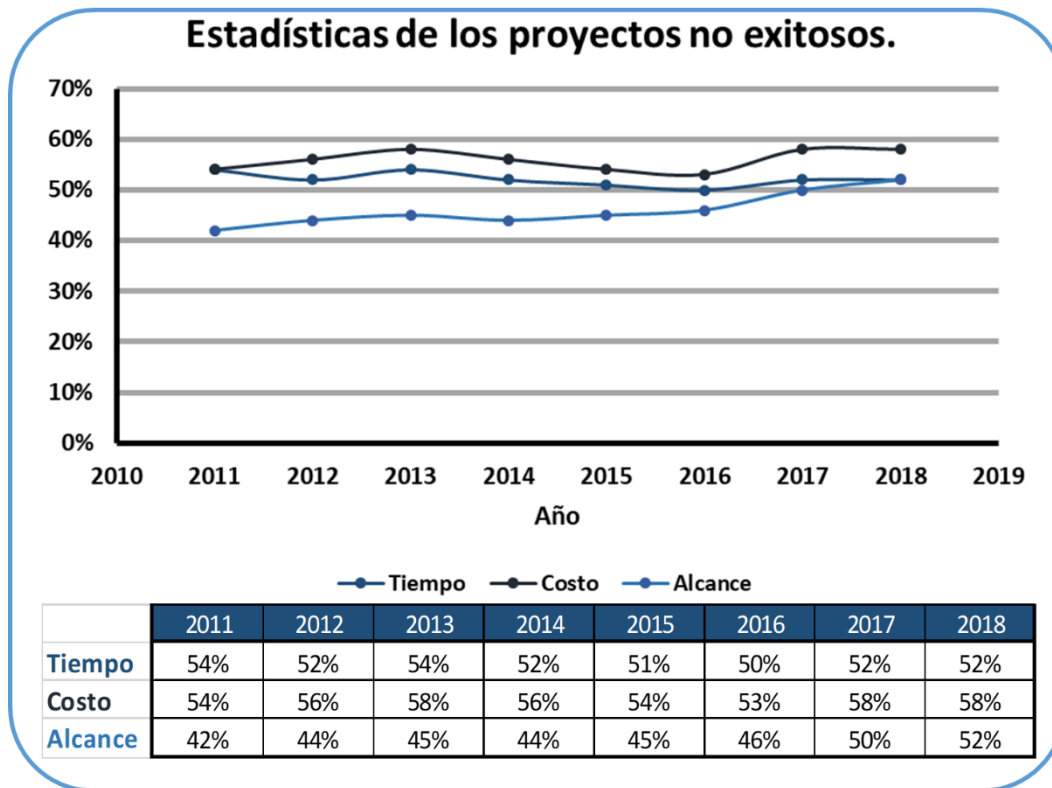


Figura 2. Uso del Cronograma del Proyecto.

Para el 2018 el PMI encontró para distintas industrias, entre ellas empresas de telecomunicaciones, energía, manufactura y construcción, que el promedio de proyectos que cumplieron en el tiempo estipulado en el contrato fue de únicamente el 52%, adicionalmente a ese 52% hubo solamente un 58% de proyectos los cuales cumplieron con el presupuesto estimado para el proyecto.<sup>4</sup>



*Figura 3. Estadísticas de los proyectos no exitosos*

Este nivel de incumplimiento en alguno de los atributos del proyecto ha orillado a muchos autores a realizar un gran número de análisis de “¿por qué los proyectos fallan?”. Avots define como algunas de las mayores causas de falla en los proyectos a la mala definición de las tareas, la falta de control en los proyectos, la falta de un plan adecuado de terminación, etc.<sup>6</sup>

Brooks pone dentro de las 5 causas más frecuentes de “¿por qué los proyectos fallan?” en primer lugar a la falta de una técnica adecuada de estimación de la duración de los proyectos, así como, la falta de monitoreo del avance del proyecto.<sup>7</sup>

Black realizó entrevistas a distintos gerentes de proyectos con el fin de determinar las causas más probables de las fallas en los proyectos, los resultados que encontró muestran que algunas de las causas principales

están relacionadas con la pobreza en las estimaciones de la duración de las tareas y a la mala calidad de un análisis del riesgo intrínseco.<sup>8</sup>

Pinto y Mantel proponen como una de las causantes del fracaso en proyectos el uso de herramientas inadecuadas al realizar la programación de las tareas.<sup>9</sup>

Matta y Ashkenas pone como una de las mayores causas de fracaso a que las tareas críticas quedan, muchas veces, fuera de plan del proyecto y por lo tanto del plan de mitigación de riesgos.<sup>10</sup>

Neimat realizó un análisis de 18,000 consultas realizadas a gerentes de proyectos en el cual demuestra que los estimados irreales de tiempo y/o recursos contribuyen en gran medida al fracaso en los proyectos.<sup>11</sup>

Para solventar muchas de las variables que influyen en el fracaso de los proyectos los gerentes hacen uso de herramientas que mitigan el riesgo asociado a la ejecución, tales como la programación, la planeación, etc. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones en el uso de estas herramientas el riesgo no es correctamente mitigado debido al desconocimiento y/o a la falta de información sobre el correcto uso de estos métodos lo que limita la capacidad de las herramientas de control estadístico que le permitirían al gerente tener un panorama amplio de los riesgos asociados a las tareas, sumado a el enfoque tradicional en donde no todos los expertos se encuentran involucrados abriendo paso a los riesgos de "espacio en blanco" en donde algunas de las actividades necesarias no fueron identificadas a tiempo dejando huecos en el plan del proyecto.<sup>10</sup>

Debido a esto brindar una herramienta más para el correcto uso de los métodos estadísticos de control del tiempo en la ejecución de proyectos como la que en este documento se presenta es de suma importancia.

Los métodos estadísticos de control en los que se enfoca este documento son la cadena crítica y el método Montecarlo los cuales cuentan con un gran número de usuarios en todo el mundo.<sup>12</sup> Su elección depende en gran medida del tipo de proyecto y de la organización.

Como se ha observado, la incertidumbre asociada a las tareas es una de las causas que condicionan en mayor manera el desarrollo de los proyectos llegando a causar problemas con la calidad del resultado, retrasos en la ejecución, etc.<sup>12</sup>

La incertidumbre asociada a las tareas es una variable que algunos métodos de control toman en cuenta, tal es el caso de la cadena crítica ya que este método dota de un enfoque de "desarrollo a tiempo" al proyecto, mejorando la velocidad de desarrollo y la calidad del mismo.<sup>12</sup> Todo esto se logra debido a la estructura misma del método, la cual reduce el sistema de multitareas que en la mayoría de los proyectos es un método no productivo e inclusive perjudicial, por otro lado, su estructura se enfoca en la ejecución secuencial de las tareas dando como resultado el cumplimiento temprano de las tareas críticas e inclusive de las tareas de baja importancia.<sup>12</sup>

Por otra parte, el método Montecarlo se ha vuelto un método de gran utilidad como herramienta de gerencia de proyectos debido a la creciente complejidad de los proyectos. Esto justifica en gran parte su uso debido a la posibilidad que da de trasladar la incertidumbre específica de una o más tareas, en el impacto potencial que estas tendrán en los objetivos totales del proyecto.<sup>13</sup>

Otra de las ventajas que presenta este método, es la facilidad de uso ya que requiere, a groso modo, de mínimos requerimientos: un software capaz de ejecutar el análisis y el set de tareas a analizar, sin embargo, la simplicidad del método no afecta su gran poder de análisis ya que con un

poco de habilidad por parte del usuario el análisis Montecarlo es capaz de incluir factores complejos como son las incertidumbres de la red de tareas, las incertidumbres asociadas a la disponibilidad de recursos, etc.<sup>13</sup>



## **2 Antecedentes**

### **2.1 Proyectos y la administración de proyectos.**

Se puede definir a un proyecto como un conjunto de actividades temporales orientadas a crear un producto o servicio único en un tiempo definido y con recursos limitados.<sup>1</sup> Al inicio de un proyecto, así como todas las etapas intermedias hasta el fin del mismo se le conoce como el ciclo de vida del proyecto, aunque cada proyecto es único y por lo tanto su diseño no se considera una operación rutinaria, las etapas que componen su ciclo de vida regularmente se pueden configurar en una estructura como la siguiente:<sup>1</sup>

- Inicio del Proyecto
- Organización y preparación
- Ejecución del proyecto
- Cierre del proyecto

Es importante mencionar que los proyectos pueden constar de cualquier número de fases y por lo regular estas se encuentran vinculadas entre sí de forma lógica.

El éxito de un proyecto está en función del cumplimiento de los objetivos propuestos y no solo eso, sino que, también contempla el tiempo, el costo, el uso eficiente de los recursos y la tecnología utilizada para alcanzar dichos objetivos.<sup>14</sup> Es decir que el éxito de un proyecto depende de sus atributos y es más que la suma de sus partes.

Partiendo de la búsqueda del éxito es como se crea la administración de proyectos, la cual se vale del uso de distintas técnicas y herramientas con el fin de planear, monitorear y controlar todos los aspectos concernientes al cumplimiento de los objetivos del proyecto, cuidando el tiempo de ejecución, el costo específico y la calidad deseada. A estos tres puntos

(costo, calidad y tiempo) se les conoce como el triángulo de hierro de los proyectos.<sup>15</sup>

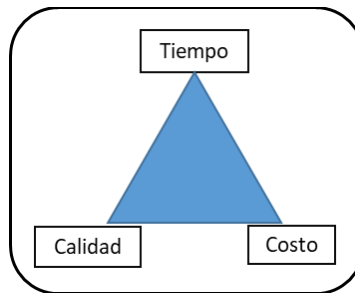


Figura 4. Triángulo de hierro.

A menudo la administración de un proyecto requiere tener un carácter multidisciplinario para lograr coordinar todas las necesidades de un proyecto, así como, de un equipo de personas que nunca antes han trabajado juntos por lo que representa un reto importante no solo para el gerente, sino que también para cada uno de los colaboradores.<sup>16</sup>

Con la finalidad de alinear a todas las personas involucradas en el proyecto y facilitar un poco el entendimiento de los procesos involucrados en el desarrollo de un proyecto, organizaciones como el *Project Management Institute*, PMI, se han dado a la tarea de crear distintas metodologías para abordar la administración y ejecución de un proyecto, tal es el caso que el PMI define a la administración de proyectos como un conjunto de cinco procesos simples:

- **Iniciación del proyecto**  
En esta etapa se preparan los documentos de justificación y beneficio que otorgará el futuro proyecto, de igual forma, se designa un gerente de proyecto.
- **Planeación del proyecto**  
Se define a fondo todo el trabajo y recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto, así como, la calidad y cantidad de entregables, se programan las actividades necesarias y se evalúan los riesgos.

- **Ejecución**  
Se efectúan las labores de gerenciamiento y comienza el trabajo de todo el equipo de proyecto.
- **Monitoreo y Control**  
Las labores de este proceso son fundamentales ya que en esta etapa se lleva un registro del progreso del proyecto, se realizan las comparaciones entre el avance real y el programado, y con base en estas comparaciones se toman decisiones para evitar cualquier desviación de la línea base.
- **Cierre del Proyecto**  
El cierre del proyecto conlleva al cierre contractual, al cierre administrativo y al cierre financiero.<sup>14</sup>

## **2.2 Planeación.**

La fase de planeación en los proyectos está íntimamente relacionada con el índice de éxito que se puede obtener y de manera simple se puede definir como la acción de prepararse para lo imprevisto en los proyectos.<sup>9</sup> La planeación de un proyecto involucra la selección y definición de los objetivos y establece las políticas, procedimientos y programas necesarios para conseguirlos.

La planeación está compuesta por nueve componentes principalmente:

- **Objetivos:** Meta que busca lograrse en un determinado tiempo.
- **Programa:** Secuencia de actividades y acciones a realizar para lograr los objetivos.
- **Calendario:** Plan detallado el cual muestra las fechas de inicio y terminación de cada una de las tareas a realizar.
- **Presupuesto:** Se refiere a los recursos necesarios para el logro de los objetivos.

- Pronósticos: Se trata de una proyección de los resultados esperados en un cierto tiempo.
- Organización: Asignación de las posiciones, así como, de los deberes y responsabilidades requeridos para lograr los objetivos.
- Políticas: Puede verse como una guía del "cómo actuar".
- Procedimientos: Se trata de un método detallado sobre cómo realizar una acción.
- Estándares: Definición de los criterios de aceptabilidad.<sup>14</sup>

Como se ha mencionado anteriormente la correcta planeación se encuentra ligada a proyectos exitosos, de acuerdo con la literatura se puede asignar una correlación de 0.34 entre la planeación y el éxito del proyecto.<sup>17</sup> Por otra parte una correcta planeación viene seguida de una correcta metodología de control y monitoreo.<sup>18</sup>

### **2.3 Control.**

El control de un proyecto requiere de técnicas estadísticas, deducciones y conjeturas que pueden ser aplicadas a cada uno de los atributos del proyecto (tiempo, costo y calidad).<sup>19</sup>

- Control del tiempo.  
El tiempo del proyecto en términos de la línea base del proyecto es un elemento crítico por lo que se han desarrollado diversas técnicas como lo son el método de la ruta crítica, el método PERT (Project Evaluation and Review Techniques), los gráficos de Gantt entre otros.

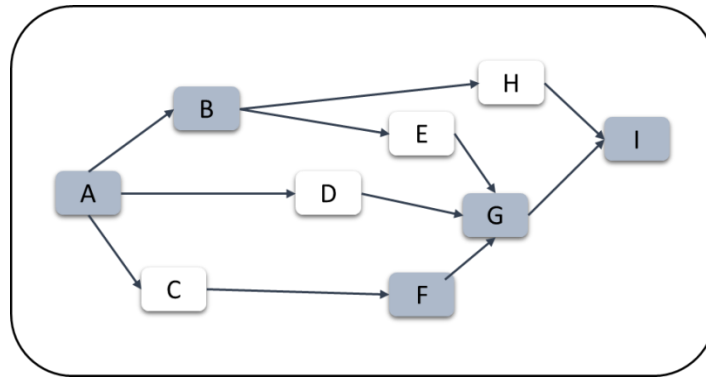


Figura 5. Representación de ruta crítica

ACTIVIDAD	INICIO DEL PLAN	DURACIÓN DEL PLAN	INICIO REAL	DURACIÓN REAL	PORCENTAJE COMPLETADO	PERIODOS (Meses)													
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Actividad 01	1	3	1	3	5%														
Actividad 02	1	5	1	5	0%														
Actividad 03	5	5	5	5	0%														
Actividad 04	10	4	10	4	0%														
Actividad 05	10	7	10	7	0%														
Actividad 06	17	3	17	3	0%														
Actividad 07	1	24	1	24	0%														

Figura 6. Representación Diagrama de Gantt

- Control del costo.  
La gran inversión y complejidad de los proyectos industriales hace que el control de costos sea uno de los pasos más importantes en cualquier proyecto. Entre las técnicas más utilizadas para el control de costos se encuentran las simulaciones.
- Control de la calidad.  
El control de calidad de un proyecto busca alcanzar los objetivos cumpliendo con las especificaciones y requerimientos propuestos desde la definición misma del proyecto.<sup>19</sup>

### 2.3.1 Método de la ruta crítica (CPM).

La ruta crítica, en administración de proyectos, se refiere a la técnica de análisis de redes de actividades que determina la duración más larga y con menor holgura de una secuencia de tareas.<sup>20</sup>

El objetivo principal del uso de la ruta crítica es ayudar en el análisis y en la ejecución del proyecto con el fin de identificar de mejor forma el tiempo necesario para completar el proyecto. Prioriza las actividades dependiendo cual sea la más "crítica" brindándole una mayor atención con el fin de concluirla lo más temprano posible.<sup>21,22</sup>

La ruta crítica se encuentra ligada a una buena definición del WBS (Work Breakdown Structure), donde el proyecto se encuentra fraccionado en actividades o tareas individuales que facilitan la visualización del proyecto completo. El análisis de esta estructura permite identificar las tareas críticas que por definición son todas aquellas en las que un retraso en su cumplimiento afecta el tiempo de ejecución del proyecto completo.<sup>21,23</sup> Otra definición que se tiene de una tarea crítica es: aquella que tiene una holgura total igual a cero, esta definición es de gran ayuda durante el proceso de programación en forma de red de las actividades.<sup>24</sup>

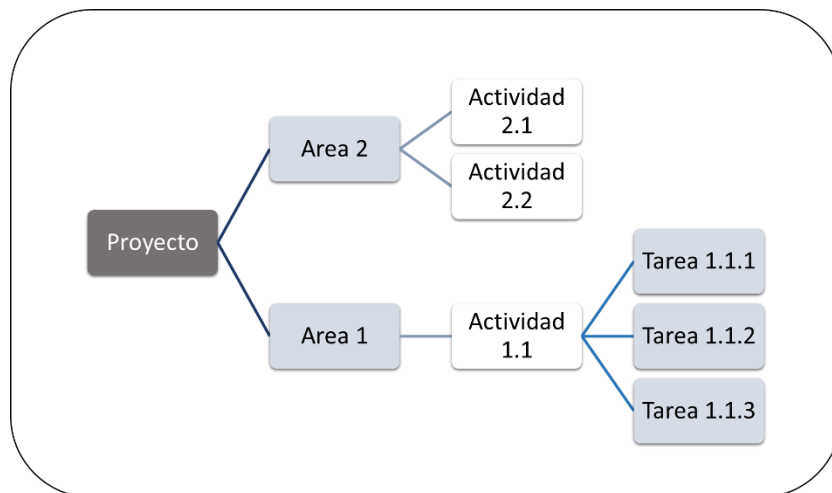


Figura 7. Representación WBS (Work Breakdown Structure)

### 2.3.1.1 Método de cálculo AON (Activity on Node)

El método AON exhibe la progresión de actividades en forma de red donde las actividades se colocan dentro de "cajas" conectadas por flechas que expresan la relación existente entre actividades.<sup>24,25</sup>

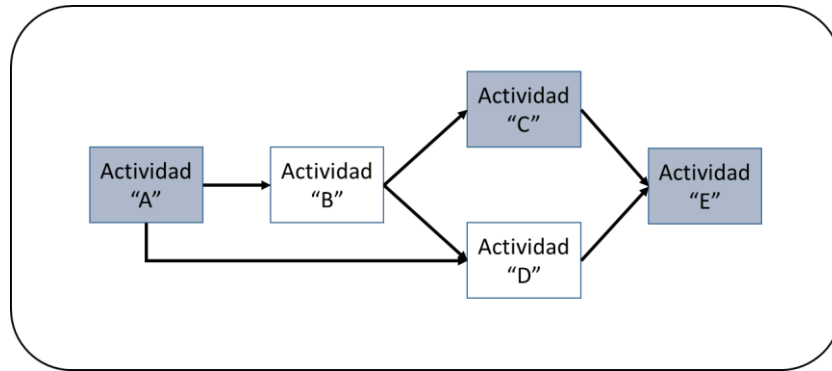


Figura 8 Diagrama de red.

Las relaciones entre tareas suelen ser de dependencia, atrasos y adelantos. Estas relaciones van ligadas con los criterios de sucesión de la red lógica.

- Dependencia Fin-Inicio (F-S): Esta relación es usada para denotar que una actividad no puede ser iniciada hasta que su precedente esté terminado.
- Dependencia Final-Final (F-F): Se trata de una relación en la cual una actividad no puede terminar hasta que la actividad anterior no haya terminado.
- Dependencia Inicio-Inicio (S-S): Es una actividad lógica en la que una actividad no puede iniciar hasta que la sucesora no haya iniciado.
- Dependencia Inicio-Fin (S-F): Esta relación es usada cuando una actividad sucesora no puede iniciar hasta que la predecesora haya terminado.<sup>1</sup>

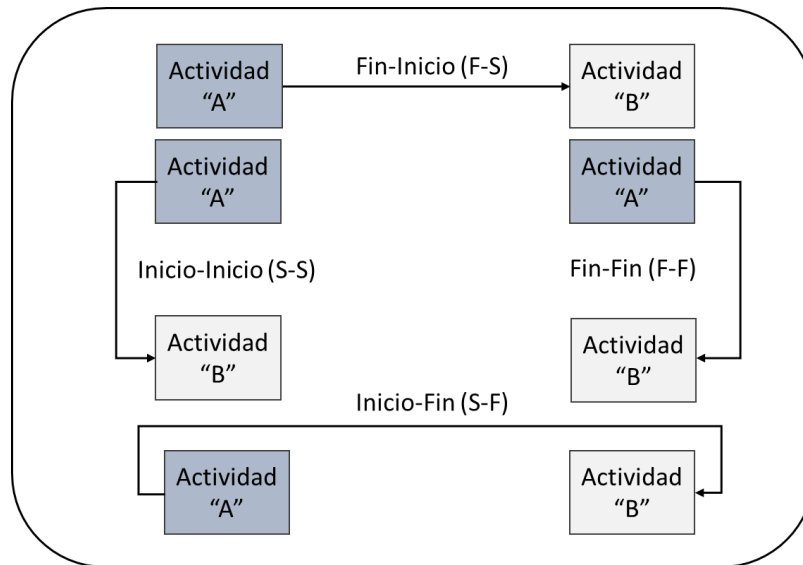


Figura 9. Tipos de Relaciones Lógicas.

Es importante mencionar que la construcción del diagrama de red debe obedecer los criterios de sucesión y dependencia entre tareas según el proyecto, una vez terminado el arreglo se procede a realiza el cálculo de las fechas de la actividad.

Los atributos de una actividad, según el método de la ruta crítica, son los siguientes:

- ES (Early Start): Fecha más temprana en la cual una actividad puede comenzar.
- EF (Early Finish): Se trata de la fecha más temprana de término de una actividad.
- LS (Late Start): Al contrario del inicio temprano, esta marca establece el inicio más tardío en la cual una actividad puede comenzar sin causar un retraso en la fecha de culminación del proyecto.
- LF (Late Finish): Fecha más tardía en la cual una actividad pueda terminar sin causar un retraso en la fecha de culminación del proyecto.



- FF (Free Float): Número de días que una actividad puede postergarse sin causar el retraso de una actividad.
- TF (Total Float): Número de días que una actividad puede postergarse sin comprometer la fecha de término del proyecto.<sup>24</sup>

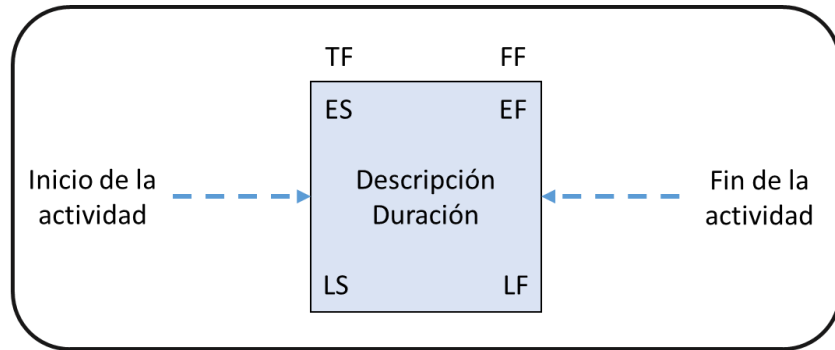


Figura 10. Componentes de una actividad.

Existen dos métodos por los cuales es posible identificar la ruta crítica y que son necesarios para la construcción completa del diagrama de red, el método de "paso hacia adelante" y el método de "paso hacia atrás".<sup>21</sup>

El método de paso hacia adelante (Forward Pass) calcula la fecha más temprana en la cual el proyecto puede ser terminado.<sup>24</sup>

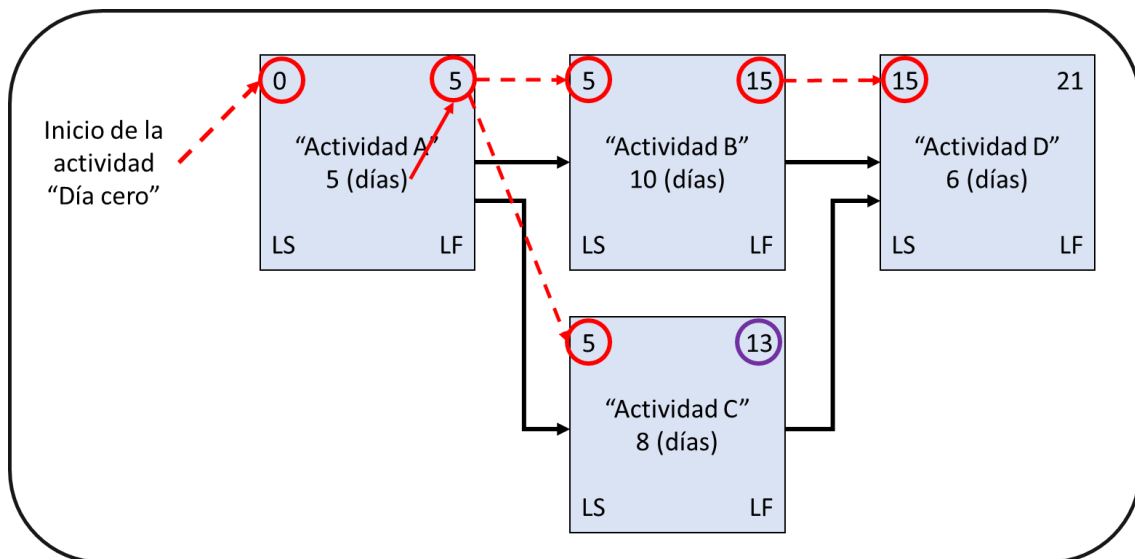


Figura 11. Ejemplo de cálculo de ES y EF.

El método de Forward Pass (véase fig. 11) comienza con:

- 1 La asignación del día "cero" a las actividades que se realizan de manera simultánea con el inicio del proyecto.
- 2 El inicio temprano de las actividades posteriores al día cero corresponden a la fecha de fin temprano de la actividad sucesora, en caso de existir dos o más actividades sucesoras inmediatas se tomará el valor más alto de fin temprano de las actividades.
- 3 El inicio temprano de la actividad corresponde a la suma del inicio temprano de la actividad y su duración.<sup>24</sup>

$ES = \text{Valor más alto de EF de las actividades predecesoras inmediatas.}$

$EF = ES + \text{Duración de la actividad.}$

Por otra parte, para el cálculo de las variables LS y LF requiere del método de Backward Pass (véase fig. 12).

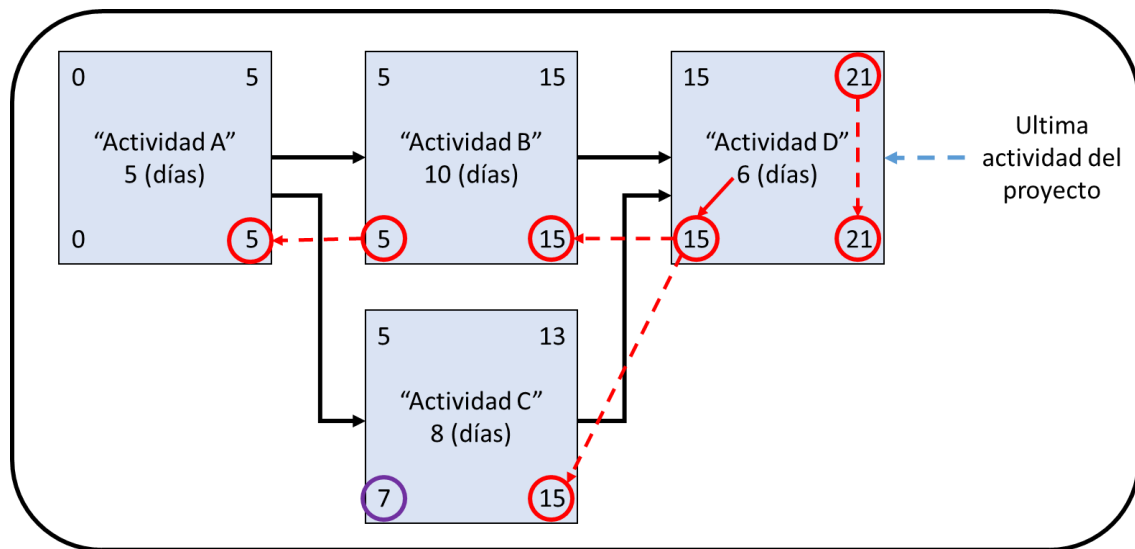


Figura 12. Ejemplo de cálculo de LS y LF.

- 1 Este método comienza con la fecha de terminación temprana de la última actividad en el proyecto, esta fecha es asignada como LF de la última actividad.

- 2 El cálculo del inicio tardío prosigue restando la duración de la actividad al LF, el valor obtenido corresponderá a LS.
- 3 El final tardío de la actividad predecesora será igual el valor de LS de la actividad sucesora inmediata.
- 4 En el caso de existir dos o más dependencias entre tareas se tomará el valor de LS más pequeño para asignar el valor de LF de las actividades predecesoras.<sup>24</sup>

$$LS = LF - \text{duración de la tarea.}$$

$$LF = \text{valor mínimo de LS de las actividades sucesoras.}$$

Una vez se han calculado las variables ES, EF, LS y LF se procede a realizar el cálculo de las holguras. Las holguras se refieren al tiempo en que una actividad puede ser postergada sin afectar el cumplimiento de una actividad sucesora o la fecha de terminación del proyecto, las holguras aplicadas al método de la ruta crítica son TF y FF.

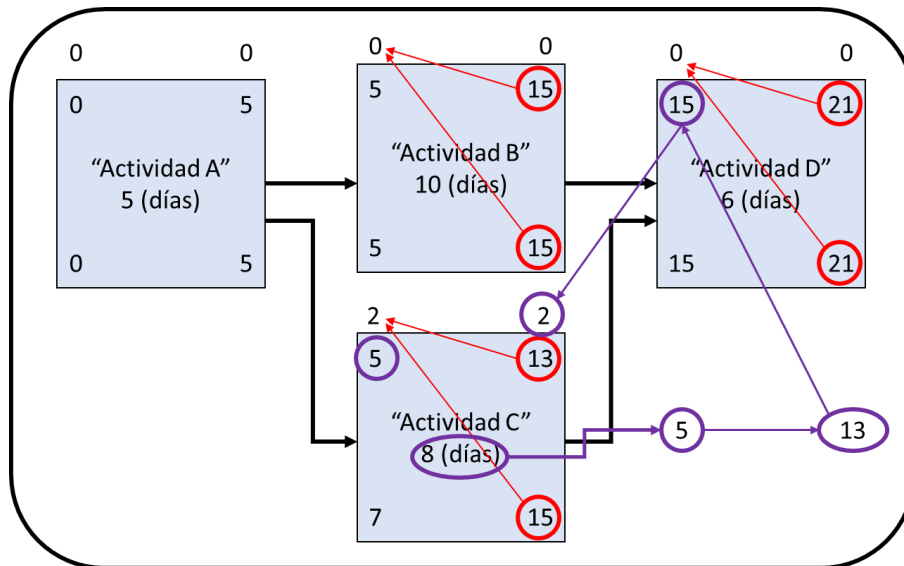


Figura 13. Cálculo de holguras TF y FF.

Como se ha mencionado anteriormente, la ruta crítica corresponde a la secuencia de tareas con una holgura total igual a cero, esta secuencia puede identificarse de forma sencilla en la figura 13.

### 2.3.2 Método de la cadena crítica (CCM)

El método de la cadena crítica puede ser visto como una combinación entre la ruta crítica y las limitaciones presentes en el proyecto como la limitación de recursos, las incertidumbres en la terminación de las tareas y los efectos de la optimización.<sup>1,26</sup>

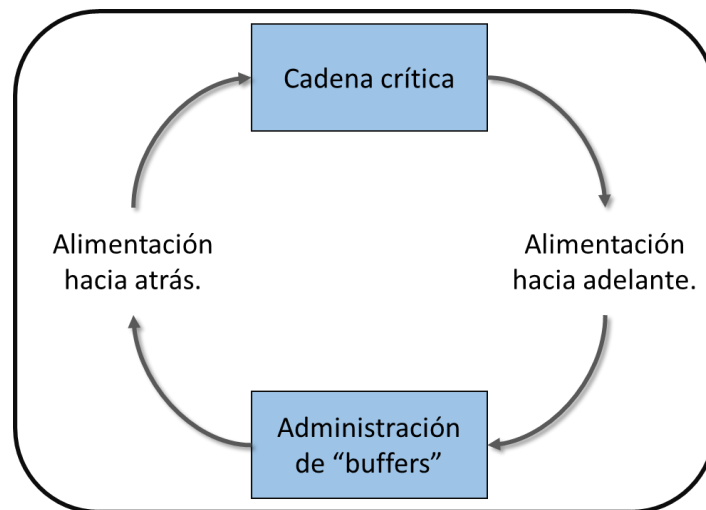


Figura 14. Cadena crítica.

La cadena crítica comienza de igual forma que el CPM, se establece un programa de tareas tentativo que posteriormente se usa para identificar la secuencia de tareas que resulta en la ruta más larga para el cumplimiento del proyecto una vez que se han asignado los recursos. La asignación de los recursos es un paso de gran importancia en el CCM debido a que, al menos uno de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto tiene una disponibilidad limitada pudiendo causar variaciones en el cumplimiento de las actividades.<sup>27</sup> Para disminuir estas variaciones y proteger el proyecto de incumplir con el programa establecido el método de la cadena crítica añade "buffers" con lo que intenta mejorar el tiempo de cumplimiento.<sup>28</sup>

Podemos ilustrar el método de la cadena crítica con el siguiente ejemplo:

- 1 Dada una secuencia de actividades se toma la cadena más larga de actividades dependientes.

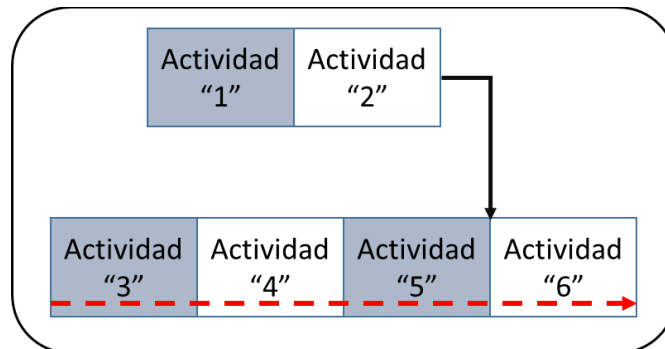


Figura 15. Secuencia de actividades.

- 2 Posteriormente se asignan los recursos necesarios y la duración de cada actividad. En el caso de la figura 16 los recursos de cada actividad están marcados en la esquina inferior derecha y la duración en la esquina inferior izquierda.

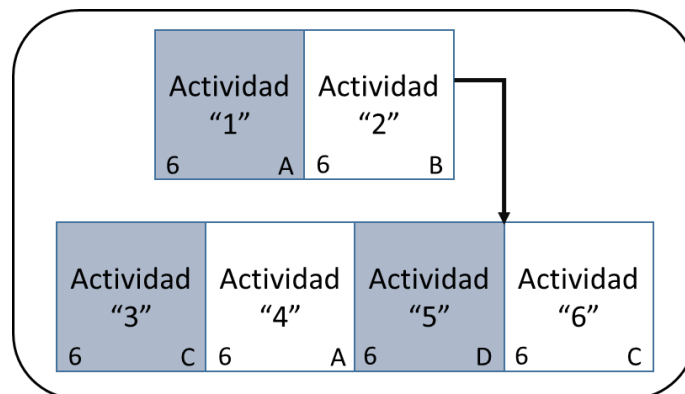


Figura 16. Secuencia con recursos.

- 3 En el caso donde dos o más tareas tiene un mismo recurso y se ejecutan de forma simultánea, como lo podemos observar en la figura 16, se deberá dar un porcentaje de disponibilidad de los recursos para así ajustar la duración de las tareas. Ajustando al 50% de disponibilidad para cada tarea se obtiene una cadena crítica modificada (véase fig. 17).

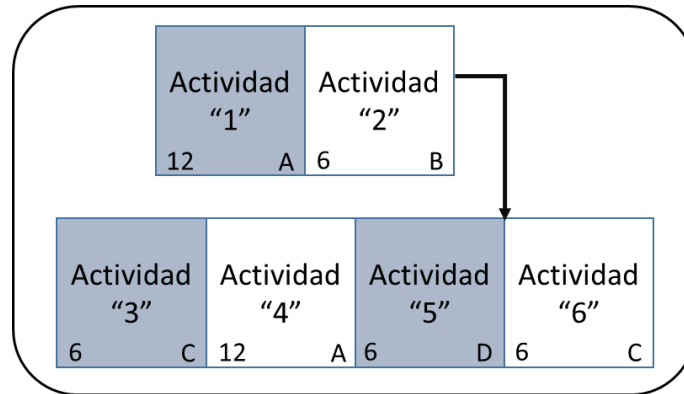


Figura 17. Cadena ajustada.

- 4 Otra de las formas en las que se puede solucionar el problema del traslape de recursos es mediante el reacomodo de tareas. En el caso concreto de la figura 16, en donde las dos actividades 1 y 4 se traslapan podemos modificar la cadena para establecer un nuevo orden de dependencias.

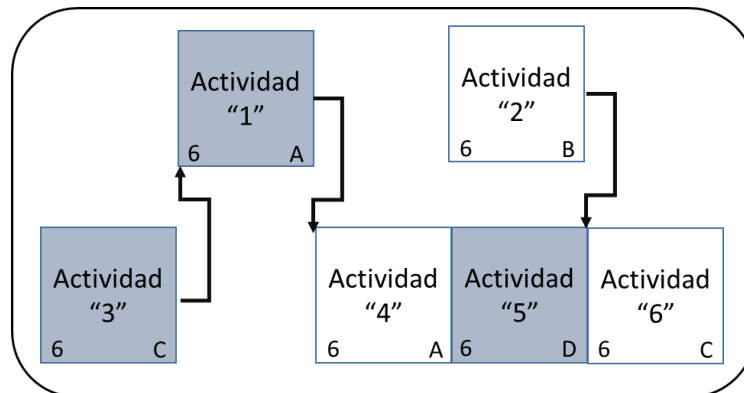


Figura 18. Reacomodo de la cadena.

- 5 Una vez identificada la cadena crítica y asignados los recursos se procede a realizar la protección de la cadena añadiendo "buffers" a cada uno de los eslabones que alimentan la cadena crítica. Y en el caso de existir inconvenientes como el del punto 3 se debe realizar nuevamente este proceso.

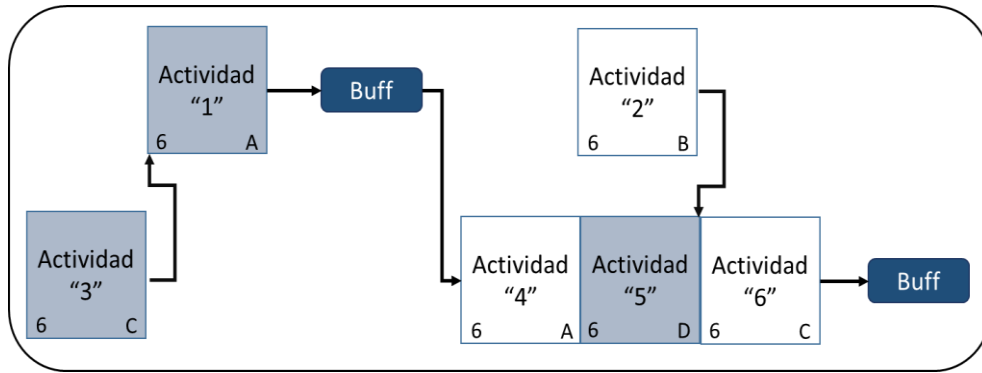


Figura 19. Ejemplo de "buffers".

### 2.3.2.1 Dimensionamiento de "buffers".

La estimación individual de la duración de las tareas para el método de la cadena crítica debe tomar en cuenta posibles imprevistos, por lo que, se añaden colchones de tiempo conocidos como "buffers". El tamaño de los "buffers" se estima mediante diversos métodos, entre los más usados están:

- El método de Goldratt (50% de la cadena) consiste en dar un tamaño a los buffers de alimentación y de proyecto igual a la mitad de la duración de la tarea (incluida en la cadena crítica), esto debido a que se considera que el 50% de la duración de la tarea es debido a las variaciones.<sup>28,29</sup>

La ventaja evidente de este método es su simplicidad, sin embargo, aumenta en demasía la duración del proyecto. Además, es posible que la duración del buffer de alimentación dado no sea correcta para ciertas actividades.<sup>29</sup>

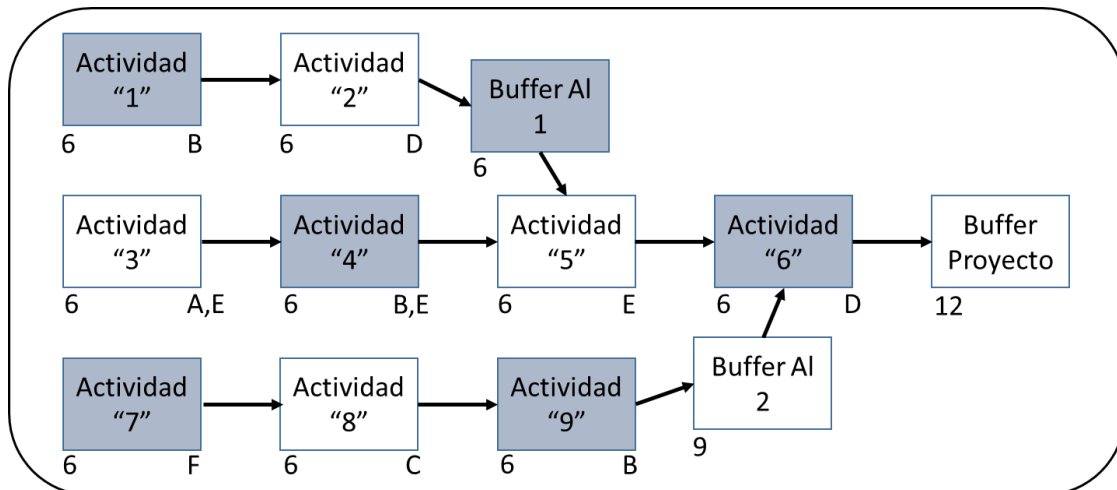


Figura 20. Método 50% o "cut and paste".

Según el método 50%, los buffers de alimentación y el buffer del proyecto se calculan sumando la duración de las actividades de la cadena involucrada y posteriormente se obtiene la mitad del valor y el resultado será la duración del buffer.

El procedimiento es el siguiente:

Suponiendo que las actividades mostradas en la figura 20 se representan por los recuadros conectados por flechas y su duración se encuentra dentro de los mismos.

Se tienen dos buffers de alimentación (BA1 y BA2), adicionalmente se tiene el buffer del proyecto (BP).

$$BA1 = 50\% \text{ de } (6+6) = 6$$

$$BA2 = 50\% \text{ de } (6+6+6) = 9$$

$$BP = 50\% \text{ de } (6+6+6+6) = 12$$

- El método de "el error de raíz cuadrada" (RSEM, root square error method) utiliza dos estimados para cada tarea de la cadena crítica. Este método involucra el conocimiento de la incertidumbre asociada a la tarea, así como, su desviación estándar.



$$\text{Tamaño del Buffer: } 2\sigma = \text{sqrt}(U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2)$$

Donde cada  $U_i$  representa la incertidumbre asociada a la tarea.

$$U_i = S_i - d_i$$

Y la incertidumbre se relaciona con el tiempo estimado de seguridad para la tarea ( $S_i$ ) y el promedio de la duración de la tarea tomando en cuenta la duración de seguridad y la duración "normal" de la tarea  $i$  ( $d_i$ ).

Ejemplo:

Se parte del siguiente ejemplo de proyecto

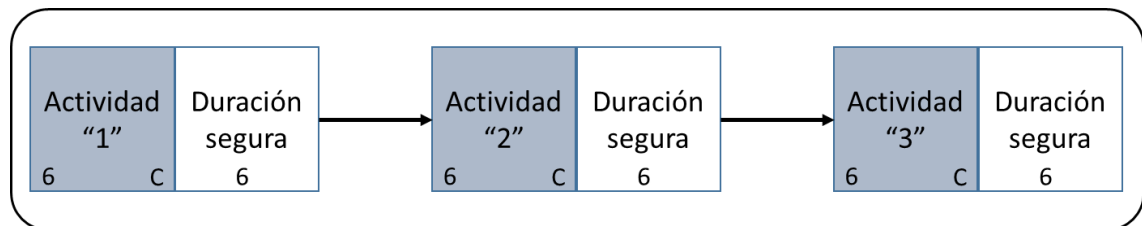


Figura 21. Caso de ejemplo RSEM.

Dadas las duraciones  $d_i=6$  de cada tarea y la duración de seguridad  $S_i=12$  se procede al cálculo de las incertidumbres asociadas.

$$U_1 = 12 - 6 = 6; \text{Será igual para las tres tareas.}$$

Posteriormente se busca calcular el tamaño del buffer.

$$2\sigma = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} = \sqrt{36 + 36 + 36} = 10.4$$

Por lo tanto, el tamaño del buffer para la cadena crítica será:

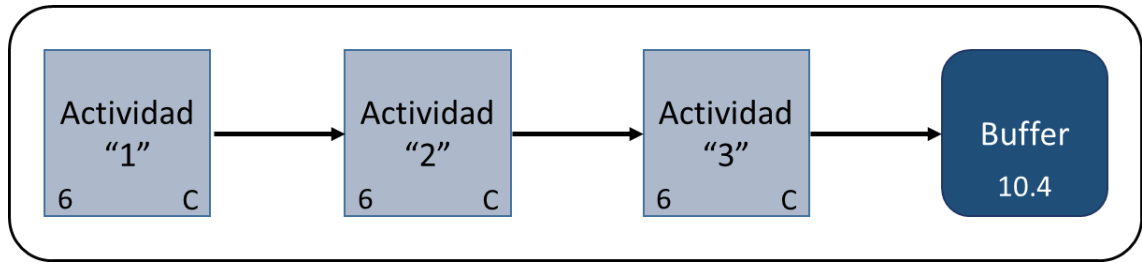


Figura 22. Tamaño del buffer por RSEM.

- Métodos adaptativos: los métodos revisados anteriormente parten de una reflexión que realizó el Dr. Goldratt, en donde, de la duración total de una tarea, el 50% del valor, se da pensando en las posibles variaciones en el cumplimiento de la misma, sin embargo, cabe la posibilidad que ese "colchón" no sea suficiente o, al contrario, que en ciertos casos la duración esté sobrada.

De estas situaciones es que se desarrollan métodos que se basan en la reflexión de los niveles de incertidumbre de las tareas individuales. Dos de los métodos más usados son el método Adaptativo con restricción de recursos-APRT (Adaptative Procedure with Resource Tightness) y el método Adaptativo con densidad-APD (Adaptative Procedure with Density).

- Método APRT (Adaptative Procedure with Resource tightness)  
El método APRT toma en cuenta la restricción de los recursos con el fin de compensar la susceptibilidad de las tareas a una desviación cuando la cantidad de recursos necesarios se encuentra limitada por la disponibilidad.<sup>30</sup>

El cálculo del buffer está en función de la desviación estándar de la duración de la cadena y de un factor que toma en cuenta la disponibilidad de recursos.

$$\text{Tamaño del Buffer} = F * \sigma_{\text{camino}}$$

Donde:

- $F$ =Factor de disponibilidad de los recursos.
- $\sigma_{\text{camino}}$ =desviación estándar de la cadena más larga que alimenta al buffer.

La desviación estándar de la cadena es resultado del análisis de las posibles variaciones que existen en cada una de las tareas que la componen. En la práctica el modelo de mayor uso para la estimación de la duración de las actividades es la estimación de tres puntos.<sup>31</sup> La estimación de tres puntos utiliza distribuciones de probabilidad triangulares para expresar el riesgo asociado a una tarea tomando en cuenta el mejor caso (a) y el peor caso posible (b).

- Asimétrica a la izquierda: El riesgo asociado a la actividad está más cercano al peor caso posible ( $m-a > b-m$ ).
- Simétrica: El riesgo asociado a la actividad da una distribución equitativa entre el mejor y el peor caso.
- Asimétrica a la derecha: El riesgo asociado a la actividad está más cercano al mejor caso posible ( $m-a < b-m$ ).<sup>31</sup>

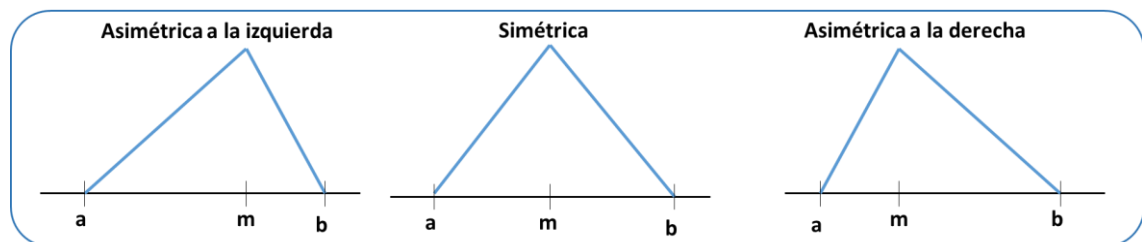


Figura 23. Tipos de distribuciones.

Tomando en cuenta los tres estimados se puede calcular una varianza asociada a cada actividad. Para este método la desviación estándar se basa en la regla "tres-sigma" o "regla 68-95-99.7" y se calcula tomando en cuenta el peor caso posible y el mejor caso.<sup>31</sup>

Desviación estándar:  $\sigma = \frac{b-a}{6}$

Varianza:  $\sigma^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2$

Ejemplo:

Tomando en cuenta el siguiente "proyecto" de 9 actividades (véase figura 24) cuyas duraciones son las siguientes:

Tabla 1 Duraciones de las actividades método APRT.

Actividad	Duración pesimista (b)	Duración optimista (a)	Desviación estándar	Varianza
Actividad 1	2	1	0.17	0.028
Actividad 2	9	6	0.5	0.25
Actividad 3	5	3	0.33	0.11
Actividad 4	2	1	0.17	0.028
Actividad 5	3	2	0.17	0.028
Actividad 6	6	4	0.33	0.11
Actividad 7	2	1	0.17	0.028
Actividad 8	3	2	0.17	0.028
Actividad 9	4	2	0.33	0.11

Para calcular la desviación asociada a cada tarea usamos:

$$\sigma_1 = \frac{b_1 - a_1}{6} = \frac{2 - 1}{6} = 0.1667$$

Para la varianza:

$$\sigma_1^2 = (0.1667)^2 = 0.0278$$

En la figura 24 observamos el arreglo de las actividades representadas como rectángulos, en la esquina inferior izquierda de los rectángulos se marca la duración de la actividad y en la parte

inferior derecha está marcado el recurso o recursos asignados a esa tarea.

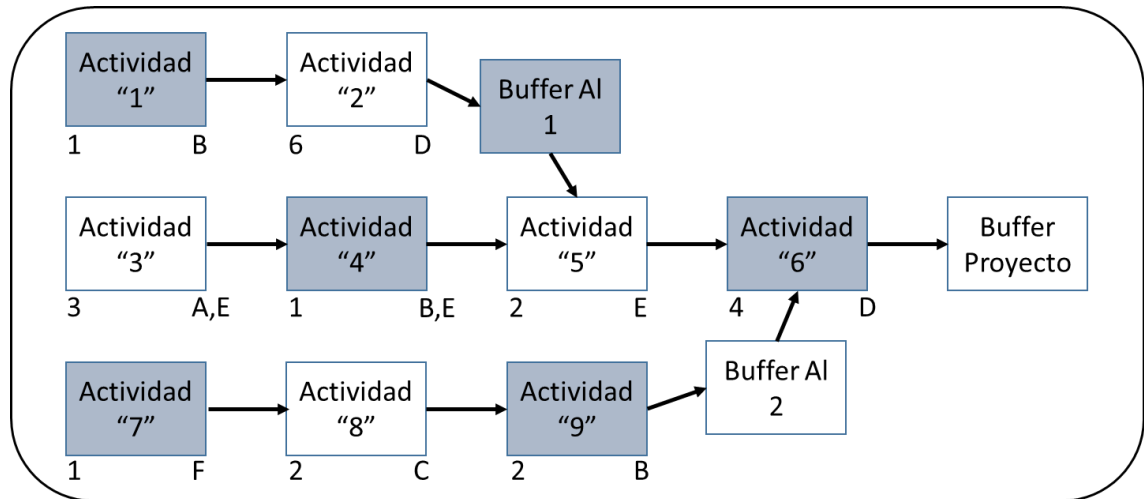


Figura 24. Tamaño de buffer para método APRT.

Para el cálculo del buffer de cada cadena (Alimentación o Crítica) es necesario conocer la desviación asociada a la cadena esta es igual a la raíz cuadrada de la suma de la varianza de las actividades que componen la cadena.

$$\sigma_{cadena\ Al\ 1} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0.028 + 0.25} = 0.527$$

$$\sigma_{cadena\ Al\ 2} = \sqrt{\sigma_7^2 + \sigma_8^2 + \sigma_9^2} = \sqrt{0.028 + 0.028 + 0.11} = 0.407$$

$$\sigma_{cadena\ crít} = \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2} = \sqrt{0.11 + 0.028 + 0.028 + 0.028} = 0.44$$

Conociendo la desviación asociada a cada "camino" es necesario conocer el factor de disponibilidad de los recursos. El factor de disponibilidad de los recursos se puede calcular como:

$$F = 1 + disponibilidad\ máxima(D_{Max})$$

La disponibilidad máxima de recursos ( $D_{Max}$ ) se obtiene del cálculo de las disponibilidades individuales de cada uno de los recursos para cada tarea en cada una de las cadenas que componen el proyecto.

Esta disponibilidad compara el trabajo requerido por actividad y el trabajo disponible a lo largo del tiempo.<sup>30,31</sup>

El trabajo requerido por cada actividad es igual a la duración de la actividad multiplicado por los recursos necesarios y el trabajo disponible es igual a la duración de la cadena más larga multiplicada por la libertad de los recursos necesarios por actividad.<sup>31</sup>

En la figura 24 además de las actividades y su estructura se muestran las duraciones y los recursos necesarios, con esto podemos calcular el trabajo requerido y el trabajo disponible.

- Trabajo Requerido (TR).

La actividad 1 ubicada en la cadena del buffer de alimentación 1 (Buff Al 1) tiene una duración de "1" y tiene asignado el recurso "B" únicamente por lo que el trabajo requerido se calcula como:

$$TR = \text{Duración de la actividad}(DA_i) * \text{Demanda de recursos}(DR_i)$$

$$TR_{1B} = DA_1 * DR_B = 1 * 1 = 1$$

- Trabajo Disponible (TD).

El trabajo disponible para el recurso B en la cadena de alimentación 1 estará dado por la duración del camino más largo que en este caso es igual a la suma de la duración de las actividades 1 y 2 que dan un total de "7", en algunos casos la cadena puede tener más de un camino por lo que se toma la duración más larga de todos los caminos posibles, posteriormente se multiplica esta duración por la "libertad de uso de los recursos", esta "libertad de uso para los recursos" se toma en cuenta cuando la organización no tiene la posibilidad de eliminar la asignación multitareas o no se

cuenta con los colaboradores necesarios para llevar a cabo el proyecto en un tiempo razonable, entre otras situaciones. La libertad de los recursos para este ejemplo se muestra en la tabla 2.

$$TD = \text{Duración del camino más largo}(DC) * \text{Libertad del recurso}(DiL_n)$$

$$TD_{Buff\ Al\ 1,B} = 7 * 1 = 7$$

- Disponibilidad de los recursos

Como ya se mencionó, la disponibilidad de los recursos relaciona el trabajo requerido y el trabajo disponible, entonces, siguiendo el ejemplo que se ha realizado para el recurso B en la cadena de alimentación 1 el cálculo de la disponibilidad sería:

$$D_{i,n} = \frac{\text{Trabajo Requerido (TR)}}{\text{Trabajo Disponible (TD)}}$$

$$D_{Buff\ Al\ 1,B} = \frac{TR_{1B}}{TD_{Buff\ Al\ 1,B}} = \frac{1}{7}$$

El resultado obtenido es la disponibilidad para el recurso B en la cadena de alimentación 1 (véase tabla 2)

Es común en los proyectos ver que un recurso es asignado a más de una actividad en la misma cadena, tal es el caso del recurso "E" en la cadena del buffer del proyecto, donde está presente en las actividades 3, 4 y 5, por lo que el cálculo se lleva de la siguiente forma:

$$D_{Buff\ Proy,E} = \frac{TR_{3,E} + TR_{4,E} + TR_{5,E}}{TD_{Buff\ Proy,E}} = \frac{3 + 1 + 2}{10} = \frac{6}{10}$$

- Disponibilidad máxima de los recursos

La disponibilidad máxima se obtiene para cada una de las cadenas tomando en cuenta cada uno de los recursos, esta disponibilidad máxima, como su nombre lo indica, será el valor máximo de disponibilidad de cualquiera de los recursos y es un valor individual para cada una de las cadenas involucradas (véase tabla 2).

$$D_{MaxBuff Al 1} = \frac{6}{7} = 0.857$$

$$D_{MaxBuff Al 2} = \frac{2}{5} = 0.4$$

$$D_{MaxBuff Proy} = \frac{6}{10} = 0.6$$

Tabla 2. Disponibilidad de los recursos método APRT

Recurso	Libertad	$D_{Buff Al 1,i}$	$D_{Buff Al 2,i}$	$D_{Buff Proy,i}$
A	1	-	-	3/10
B	1	1/7	2/5	1/10
C	1	-	2/5	-
D	1	6/7	-	4/10
E	1	-	-	6/10
F	2	-	1/10	-
Disponibilidad Máxima		6/7	2/5	6/10

Con los valores de disponibilidad máxima para cada una de las cadenas podemos calcular el factor de disponibilidad antes mencionado:

$$F_{Buff Al 1} = D_{MaxBuff Al 1} + 1 = 1.857$$

$$F_{Buff Al 2} = D_{MaxBuff Al 2} + 1 = 1.4$$

$$F_{Buff Proy} = D_{MaxBuff Proy} + 1 = 1.6$$



Finalmente, con estos datos es posible calcular el tamaño del buffer de cada uno de los caminos:

$$Buffer_{Cadena\ Al\ 1} = F_{Buff\ Al\ 1} * \sigma_{cadena\ Al\ 1} = 1.857 * 0.527 = 0.9786$$

$$Buffer_{Cadena\ Al\ 2} = F_{Buff\ Al\ 2} * \sigma_{cadena\ Al\ 2} = 1.4 * 0.407 = 0.6919$$

$$Buffer_{Cadena\ crit} = F_{Buff\ Proy} * \sigma_{cadena\ crit} = 1.6 * 0.44 = 0.704$$

- Método APD (Adaptative Procedure with Density).

La premisa del método APD menciona que las redes de tareas que se encuentran sobre cargadas con relaciones de precedencias entre cada una de sus tareas tienen una gran probabilidad de sufrir un retraso, por esto, el dimensionamiento de buffers mediante este método toma en cuenta el número de precedentes para así asignar un mayor tamaño de buffer a las actividades altamente interrelacionadas.<sup>31</sup>

De forma similar al método APRT el método de cálculo del tamaño del buffer incluye un factor, en este caso, basado en la densidad de la red, además de tomar en cuenta la desviación estándar del camino más largo que alimenta al buffer.

$$Tamaño\ del\ Buffer = K_i * \sigma_{cadena}$$

Donde:

- K=Factor de densidad
- $\sigma_{cadena}$ =desviación estándar de la cadena más larga que alimenta al buffer

El cálculo de la desviación estándar para el método APD es igual al cálculo realizado para el método APRT por lo que las duraciones de las actividades están dadas en la tabla 1 y el arreglo del proyecto se muestra en la figura 24.

El cálculo de la desviación estándar de la cadena más larga se realiza de la misma forma que se mostró en el método APRT.

Donde:

$$\text{Desviación estándar: } \sigma = \frac{b-a}{6}$$

$$\text{Varianza: } \sigma^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2$$

Ejemplo:

El siguiente "proyecto" (véase figura 25) será utilizado para ejemplificar el método de dimensionamiento de buffers APD (Adaptative Procedure whit Density).

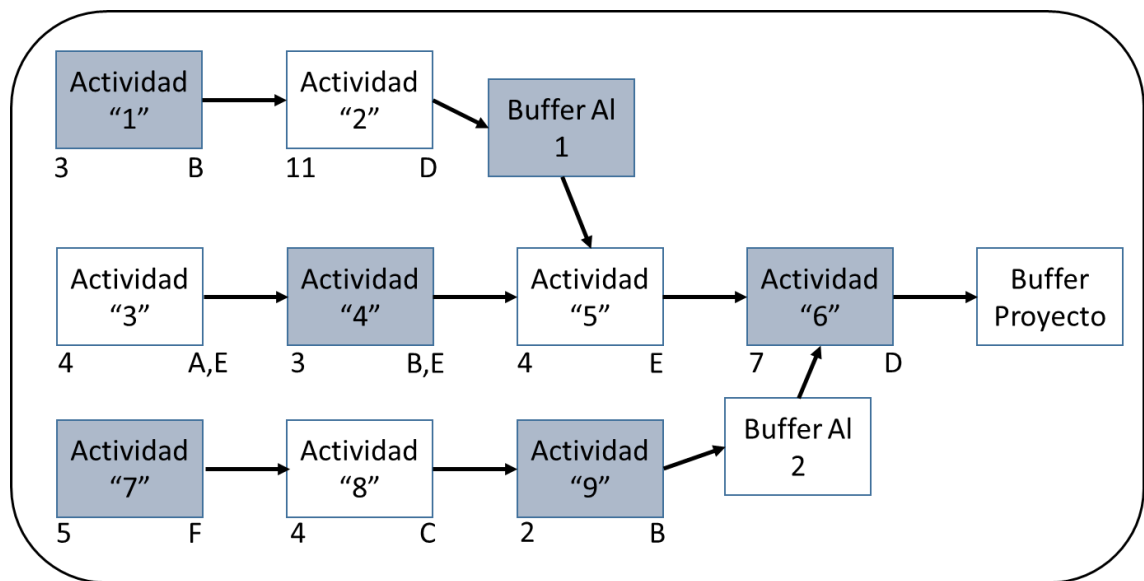


Figura 25. Tamaño de buffer para método APD.

Las duraciones optimistas y pesimistas, la desviación estándar y la varianza de las actividades del proyecto mostrado en la figura 25 se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Duración de las actividades método APD.

Actividad	Duración pesimista (b)	Duración optimista (a)	Desviación estándar	Varianza
Actividad 1	3	2	0.17	0.028
Actividad 2	11	8	0.5	0.25
Actividad 3	4	2	0.33	0.11
Actividad 4	3	1	0.33	0.11
Actividad 5	4	3	0.17	0.028
Actividad 6	7	4	0.5	0.25
Actividad 7	5	3	0.33	0.11
Actividad 8	4	2	0.33	0.11
Actividad 9	2	1	0.17	0.028

Con estos datos es posible calcular la desviación estándar asociada a cada una de las cadenas que componen el proyecto.

$$\begin{aligned}\sigma_{cadena\ Al\ 1} &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0.028 + 0.25} = 0.527 \\ \sigma_{cadena\ Al\ 2} &= \sqrt{\sigma_7^2 + \sigma_8^2 + \sigma_9^2} = \sqrt{0.11 + 0.11 + 0.028} = 0.498 \\ \sigma_{cadena\ crit} &= \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2} = \sqrt{0.11 + 0.11 + 0.028 + 0.25} \\ &= 0.706\end{aligned}$$

Posteriormente es necesario calcular el factor de densidad (Ki) para esto es necesario definir la densidad de una sub-red como una medida de las actividades y las relaciones de precedencia entre las mismas. En este caso se le conoce como sub-red al conjunto de actividades que conforman un camino dentro de la red, que es el proyecto completo, por lo que la sub-red de alimentación 1 está comprendida por las actividades 1 y 2 para el proyecto mostrado en la figura 25.

La relación actividad-precedente también es conocido como complejidad de red y se define como:<sup>29,32</sup>

$$\text{Coeficiente de complejidad de red} = \beta_i = \frac{N_p}{N_T}$$

Donde

$N_p$  = Número total de relaciones de precedencia de la actividad  $i$

$N_T$  = Número total de actividades en la cadena.

Para el proyecto de la figura 25 tendremos 3 coeficientes de complejidad de red. En la cadena de alimentación 1 compuesta por la actividad 1 y 2 tenemos que el número de relaciones de precedentes es igual a 1 debido a que la única relación de este tipo existe en la actividad 2 cuyo precedente es la actividad 1 y el número total de actividades en esta cadena es de 2, por lo tanto.

$$\beta_{Al\ 1} = \frac{1}{2} = 0.5$$

Este cálculo se realiza para las dos cadenas faltantes, los resultados se muestran en la tabla 4.

Con esto podemos definir el factor de densidad "K" como:

$$K_i = 1 + \beta_i$$

Tabla 4. Cálculo del coeficiente de complejidad.

Cadena	Número total de precedentes	Número total de actividades	Coeficiente $\beta$	Factor de densidad K
Cadena de Al 1	1	2	0.17	1.17
Cadena de Al 2	2	3	0.67	1.67
Cadena Crit	3	4	0.75	1.75

Con estos resultados podemos calcular el valor del tamaño del buffer para el método APD:

$$\text{Tamaño del Buffer} = K_i * \sigma_{cadena}$$

$$Buffer_{Al\ 1} = K_{Al\ 1} * \sigma_{cadena\ Al\ 1} = 1.17 * 0.527 = 0.617$$

$$Buffer_{Al\ 2} = K_{Al\ 2} * \sigma_{cadena\ Al\ 2} = 1.67 * 0.498 = 0.832$$

$$Buffer_{crit} = K_{crit} * \sigma_{cadena\ crit} = 1.75 * 0.706 = 1.236$$

### 2.3.3 Método Montecarlo

El método Montecarlo es una técnica que permite emular las actividades de un proyecto mediante una serie de iteraciones que permiten entender la variabilidad de un proceso y cuantificarlo. Se basa tanto en los juicios acerca de la incertidumbre que posee cierta actividad, así como, en el valor esperado de ciertos atributos.<sup>31,33,34</sup>

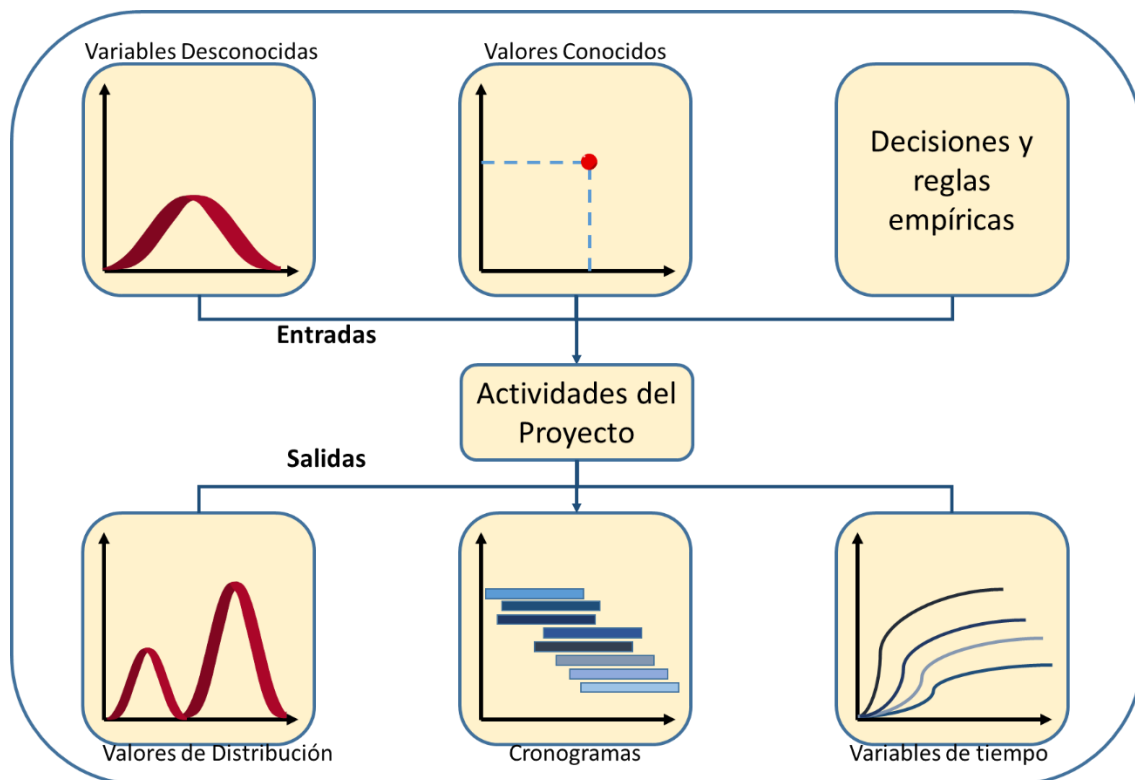


Figura 26. Esquema de Simulación.

El método Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas mediante la simulación de variables aleatorias donde el error

es aproximado a uno sobre la raíz de  $n$  donde  $n$  es el número de pruebas debido a esto se busca realizar tantas pruebas como sea posible con el fin de minimizar el error y preservar la integridad de la distribución que representa el fenómeno estudiado.<sup>34,35</sup>

La base del método Monte Carlo es la generación de números aleatorios mediante el método de transformación inversa. Se parte de una variable incierta " $x$ " que es representada por una distribución " $A$ " cuya función de distribución acumulativa,  $F(x)$ , representa la probabilidad,  $P$ , de que una variable  $X$  sea mayor o igual que  $x$ .<sup>36</sup>

$$F(X) = P(X \geq x)$$

La función inversa cumpliría el fin de dar el valor de  $F(x)$  para un valor de  $x$ , esta función inversa se representa comúnmente como:

$$G(F(x)) = x$$

Luego, para generar una muestra aleatoria de una distribución de probabilidad, se genera un número " $r$ " a partir de una distribución uniforme que va de 0 y 1, esto con el fin de darle igualdad de oportunidades de que  $x$  caiga en cualquier rango de los percentiles de la distribución, posteriormente este valor es alimentado a la ecuación de la función inversa para determinar el valor que le corresponde en la distribución.<sup>36</sup>

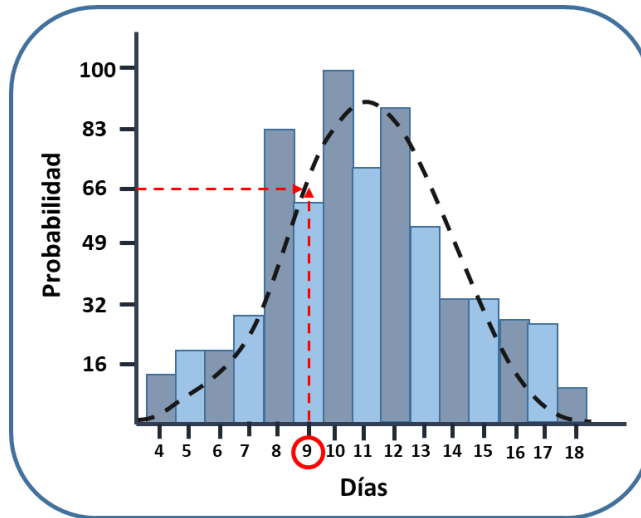


Figura 27. Distribución de una variable.

### 2.3.3.1 Distribuciones de probabilidad.

El método Montecarlo hace uso de distribuciones de probabilidad para representar el comportamiento de las variables a analizar en el proceso de simulación.<sup>36</sup>

En la actualidad existen un gran número de distribuciones de probabilidad las cuales pueden ser usadas para representar un fenómeno en particular.

#### 2.3.3.1.1 Distribución triangular.

La distribución triangular está acotada por tres parámetros los cuales son el límite mínimo (a), límite máximo (c) y valor deseado o más probable (b). Además, la distribución puede ser simétrica o recargada en alguno de sus lados dependiendo de sus parámetros.<sup>37</sup>

Una distribución simétrica sería donde su parámetro máximo es representado como:

$$c = \frac{a + b}{2}$$

Pese a que rara vez un fenómeno de la vida real es representado por una distribución triangular presenta algunas ventajas sobre las demás ya que

es la fácil de usar y de entender, al usar los parámetros mínimo, máximo y más probable representa de forma sencilla una incertidumbre. Debido a esto es una de las distribuciones más usadas en el análisis de riesgos y la administración de riesgos.<sup>37,38</sup>

#### **2.3.3.1.2 Distribución normal.**

La distribución normal es una distribución continua y simétrica que se encuentra descrita únicamente por su media  $\mu$  y su desviación estándar  $\sigma$ . A diferencia de la distribución triangular la distribución normal no se encuentra acotada por constantes definidas, sino que se extiende desde el  $-\infty$  hasta  $+\infty$ .<sup>38</sup> La distribución normal tiene la capacidad de representar eventos del mundo real de forma muy acertada por lo que es ampliamente usada para representar fenómenos los cuales no pueden tener valores negativos como sucede en el caso de las duraciones de las actividades de un proyecto.<sup>38</sup>

#### **2.3.3.1.3 Distribución logarítmica.**

La distribución logarítmica es usada para representar actividades, las cuales tienden a correr fuera de control en el caso de ir mal las cosas por lo que es ampliamente usada para representar la duración de las actividades de un proyecto. Adicionalmente la distribución logarítmica posee la capacidad de representar las relaciones entre la capacidad y el tiempo de la actividad.<sup>38,39</sup>

Finalmente se ha demostrado que el uso de la distribución normal en un entorno de simulación en donde el número de iteraciones es bajo presenta mejores resultados en comparación con la distribución normal que en la mayoría de los casos arroja valores erróneos para este tipo de condiciones.<sup>39</sup>



#### **2.3.3.1.4 Distribución BetaPERT.**

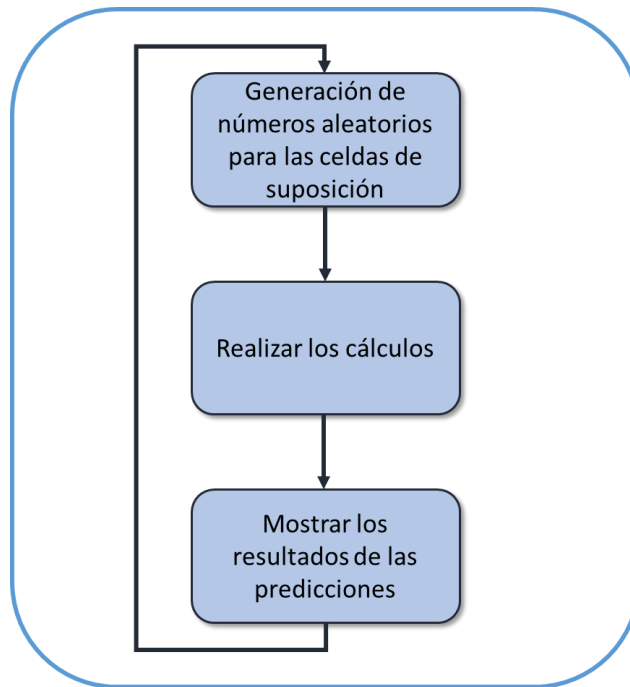
La distribución BetaPERT es la preferida en el caso de representar variables relacionadas a la duración de actividades embebidas de riesgo. Ya que esta distribución fue desarrollada específicamente para describir la incertidumbre de las actividades de un proyecto complejo.<sup>37</sup>

A diferencia de la distribución tipo Beta la distribución BetaPERT es de uso relativamente fácil ya que al igual que la distribución triangular esta está definida por los tres parámetros antes dichos sin embargo está se encuentra "suavizada" entorno a los valores más cercanos al valor más probable significando esto que se tiene un mayor grado de confianza en que el valor dado para la duración de la actividad se encuentre muy cercano al predicho.<sup>37,40</sup>

#### **2.3.3.2 Proceso de Simulación.**

Para realizar los procesos de simulación existen un gran número de softwares comerciales como son Crysta Ball®, @Risk, etc. Vale la pena mencionar que el programa utilizado para el desarrollo de este trabajo es Crystal Ball®. Este es un software de modelado predictivo, previsión, simulación y optimización de la empresa Oracle® con el cual es posible realizar predicciones utilizando el método Montecarlo.<sup>41</sup>

El método de simulación que utiliza Crystal Ball® es el siguiente:



*Figura 28. Proceso de Simulación.*

Se genera un número aleatorio para cada celda de suposición, tomándose en cuenta la distribución de probabilidad que representará la variable. Posteriormente el software hace el cálculo de la función inversa usada en el método Montecarlo. Y, finalmente se muestran los resultados en un gráfico para la predicción del escenario, continuando hasta que la simulación alcance el criterio de paro dado por el usuario (manual o automáticamente).<sup>41</sup>

Ejemplo:

El proceso básico para realizar una simulación Montecarlo en el software de Crystal Ball® inicia con la construcción de la red de actividades del proyecto. Una vez identificada la ruta crítica se seleccionan las variables inciertas, en este caso, serán las duraciones de las tareas que pertenecen a la ruta crítica, a estas variables inciertas se les asigna una distribución de probabilidad que describe de la mejor forma su comportamiento.

Consideremos un proyecto en el cual se tiene las siguientes actividades en la ruta crítica.

Ruta crítica	Días de realización		
	Optimista	Esperada	Pesimista
<b>Serie 1</b>			
Tarea 1a	3	4	7
Tarea 1b	2	5	6
Tarea 1c	3	4	5
Tarea 1d	1	2	3
Tarea 1e	2	3	4
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>25</b>
<b>Serie 2</b>			
Tarea 2a	3	4	6
Tarea 2b	29	41	57
<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>45</b>	<b>63</b>
<b>Serie 3</b>			
Tarea 3a	3	4	5
Tarea 3b	5	9	11
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>13</b>	<b>16</b>
<b>Serie 4</b>			
Tarea 4a	3	4	6
Tarea 4b	13	17	22
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>21</b>	<b>28</b>
<b>Serie 5</b>			
Tarea 5a	2	4	6
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
<b>Tiempo total</b>	<b>69</b>	<b>101</b>	<b>138</b>

Figura 29. Proyecto Montecarlo.

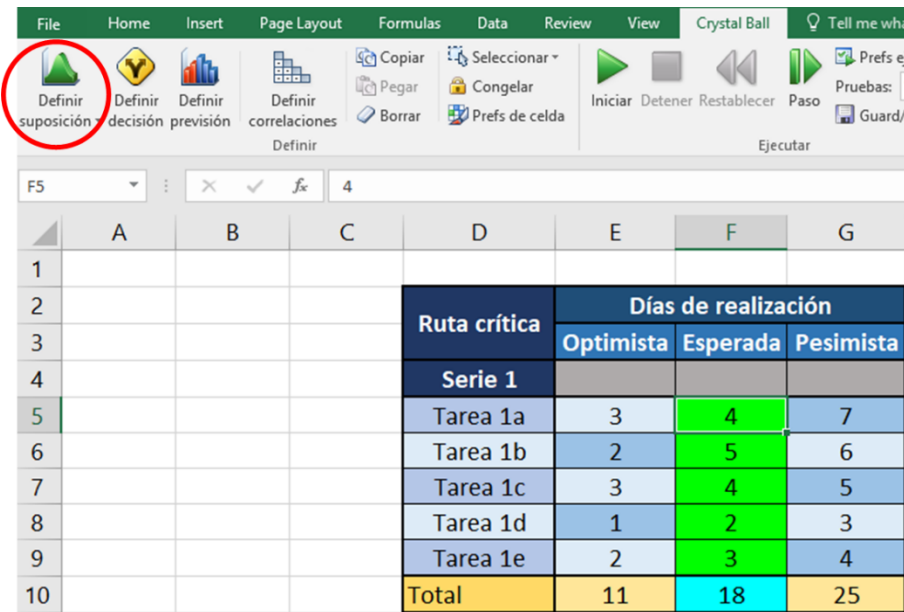
Como se ha mencionado anteriormente la duración de las tareas está sujeta a la variación debido a los riesgos asociados, por esto es necesario representar su duración con una distribución de probabilidad. El software posee distintas curvas dentro de su biblioteca, algunas de las que actualmente se usan en proyectos y que se encuentran dentro del software son:

- Uniforme  
Existe una probabilidad igual de que el parámetro de medición se encuentre dentro de cualquier rango.
- Triangular o de tres puntos

El parámetro se estima usando un valor mínimo, máximo y un valor más probable.

- Normal  
Se trata de una distribución simétrica, es una de las más comunes en la naturaleza.
- Logarítmica  
Los valores muestran una desviación. Por su naturaleza se utiliza para representar valores positivos.
- Beta  
Utiliza una fórmula matemática que incluye dos coeficientes con lo que es posible que las distribuciones beta tomen una amplia gama de formas, pasando por las formas simétricas y las no simétricas.<sup>35</sup>

Para asignar la distribución que representará la tarea se selecciona la celda objetivo, en este caso es la duración “esperada” de la tarea, y sobre la barra de herramientas de Crystal Ball se elige “Definir suposición”.



	A	B	C	D	Días de realización		
					Optimista	Esperada	Pesimista
1							
2				Ruta crítica			
3				Serie 1			
4				Tarea 1a	3	4	7
5				Tarea 1b	2	5	6
6				Tarea 1c	3	4	5
7				Tarea 1d	1	2	3
8				Tarea 1e	2	3	4
9				Total	11	18	25

Figura 30. Definir suposición.

Al definir la suposición se elige la distribución adecuada y la celda objetivo se torna de un color verde fosforescente como el que se observa en la figura 30, posteriormente se debe definir la variable de salida la cual debe de ser una formula, para esto se debe seleccionar el comando "Definir previsión".

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2				<b>Ruta crítica</b>	<b>Días de realización</b>		
3					<b>Optimista</b>	<b>Esperada</b>	<b>Pesimista</b>
4				<b>Serie 1</b>			
5				Tarea 1a	3	4	7
6				Tarea 1b	2	5	6
7				Tarea 1c	3	4	5
8				Tarea 1d	1	2	3
9				Tarea 1e	2	3	4
10				<b>Total</b>	11	18	25

Figura 31. Definir previsión.

Al realizar esta acción la celda objetivo se torna de un color azul fosforescente como el que se muestra en la figura 31.

Finalmente se procede a ejecutar la simulación, Crystal Ball crea una gráfica de previsión que permite analizar los resultados de la simulación.

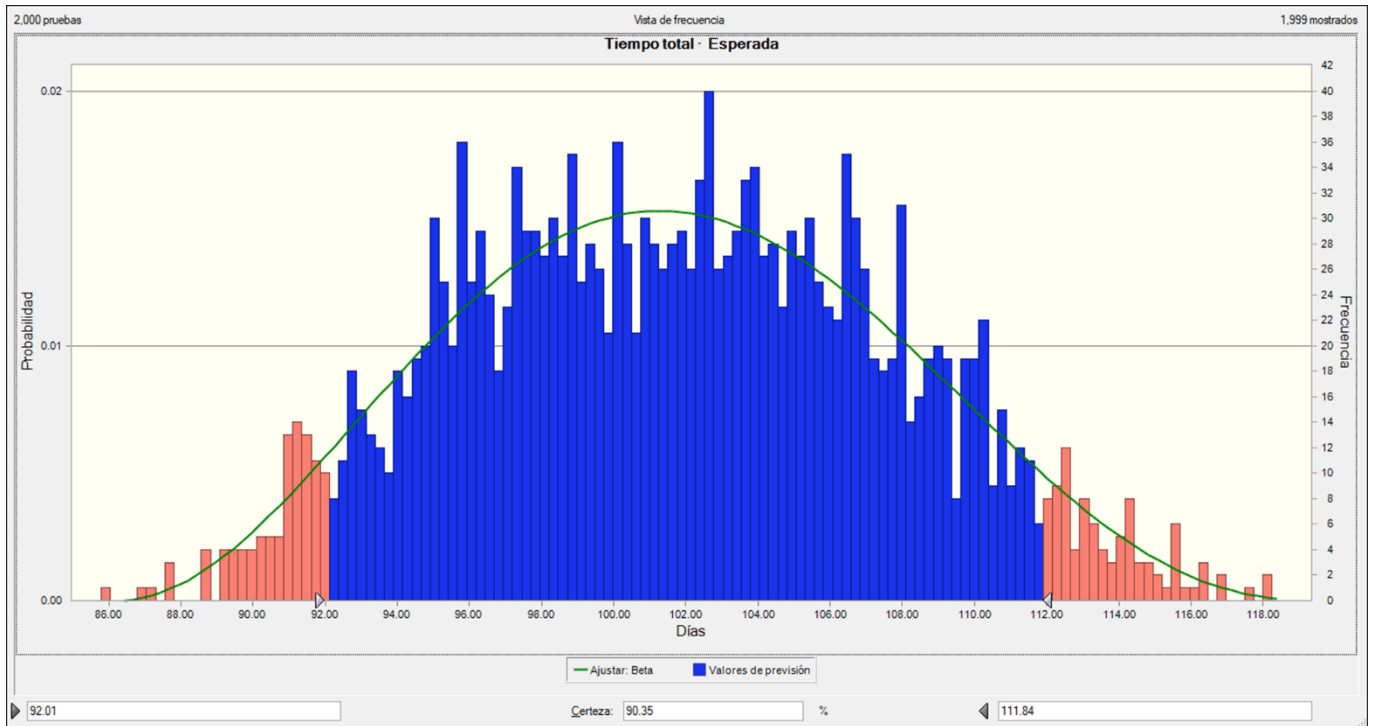


Figura 32. Gráfica de previsión.

El gráfico desplegado como el que se muestra en la figura 32, es un gráfico de frecuencia el cual muestra el número de valores que ocurren en un intervalo dado. Adicionalmente al gráfico, el programa muestra los datos estadísticos propios de la distribución.

2,000 pruebas		
Estadística	Ajustar: Beta	Valores de previsión
Pruebas	---	2,000
Caso base	---	101.00
Media	101.76	101.76
Mediana	101.64	101.76
Modo	101.28	---
Desviación e	5.98	5.98
Varianza	35.72	35.74
Sesgo	0.0900	0.0900
Curtosis	2.41	2.40
Coficiente d	0.0587	0.0587
Mínimo	86.10	85.77
Máximo	119.82	118.59
Error estándar	---	0.13

Figura 33. Estadística de la simulación.

Para el proyecto de la figura 29 se dio una duración estimada de 101 días de forma determinística, sin embargo, mediante el análisis Monte Carlo realizado en el software de Crystal Ball se da un nivel de certeza de 95% que el proyecto sea terminado en un rango de 92 a 112 días.

El nivel de certeza es una de las características clave de Crystal Ball, muestra la probabilidad de obtener valores en un determinado rango. Crystal Ball calcula estos niveles de certeza basándose en los rangos previstos para los valores dados por el usuario por lo que es necesario conocer los valores en los que se encuentran las variables para obtener resultados cercanos a la realidad.<sup>41</sup>

### **3 Caso de Estudio**

Para el caso de estudio se evaluará el programa de actividades de la ingeniería básica para la construcción de una plataforma de producción marina aplicando los métodos de cadena crítica y método Montecarlo.

#### **3.1 Antecedentes del caso de estudio.**

##### **3.1.1 Plataformas Marinas.**

Las plataformas marinas son estructuras instaladas mar adentro con la capacidad de aprovechar los recursos petrolíferos de la zona. La selección de un sistema de explotación costa fuera depende de más de un factor, ya que se debe considerar la profundidad, las condiciones del suelo, el tamaño del campo, etc.<sup>42,43,44</sup>

Los sistemas costa fuera (offshore) pueden ser:

- **Sistemas fijos:** Son sistemas estructuralmente rígidos, se encuentran anclados al suelo marino mediante un sistema de cimentación a base de pilotes o placas de acero.
- **Sistemas flotantes:** Estas estructuras deben su estabilidad en el mar a líneas de anclaje o elementos flexibles colocados directamente al fondo marino. Son móviles lo que les permite desplazarse a las zonas necesarias.
- **Sistemas submarinos:** Los sistemas submarinos son todas aquellas estructuras que se encuentran completamente sumergidas.<sup>44</sup>

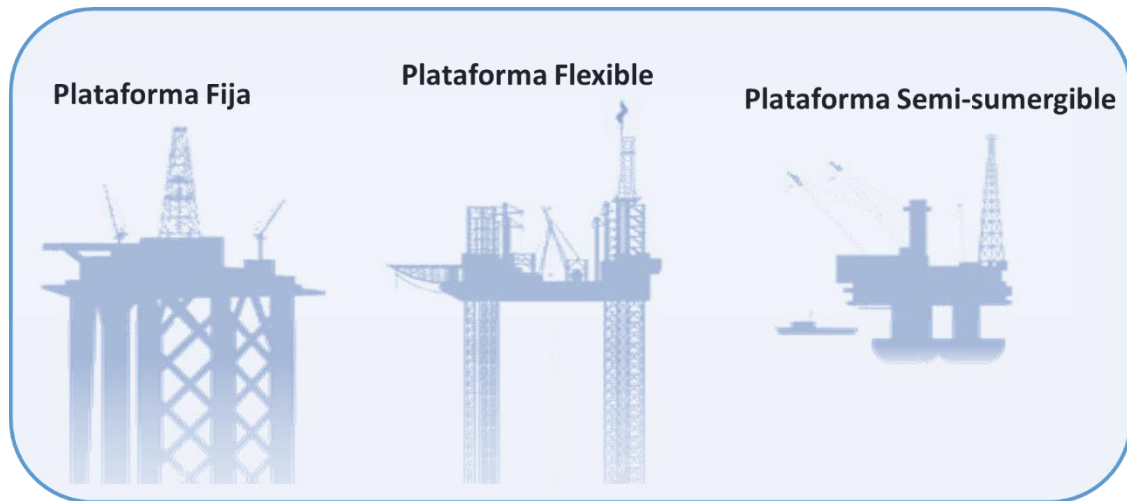
Dentro de las estructuras fijas se encuentran las estructuras tipo jacket las cuales son las estructuras más comunes para la perforación y producción. Poseen de 4 a 8 "piernas" que le otorgan la estabilidad y soporte a la estructura. Se anclan en el suelo marino y se elevan por encima del nivel del mar.<sup>44,45</sup>



La clasificación de las estructuras tipo Jacket se da comúnmente por dos de sus atributos, su función y por el número de piernas que posee. Esta clasificación se presenta en la tabla 5.

*Tabla 5. Clasificación de las estructuras tipo Jacket.*

Por su estructura		Por su función
Tres Piernas	Trípodes	Perforación
Cuatro Piernas	Tetrápodos	Inyección
Ocho Piernas	Octápodos	Producción
Doce Piernas	Dodecápodos	Enlace
		Habitacionales
		Compresión
		Rebombéo
		Telecomunicación
		Recuperación
		Quemado
		Apoyo
		Estabilización de crudo
		Almacenamiento



*Figura 34. Tipos de sistemas.*

Una de las clasificaciones de las estructuras tipo Jacket es mediante su función (véase tabla 5). La estructura particular que se tomará en este caso será una plataforma tipo Jacket tetrápodo de producción.

Las plataformas de producción brindan los servicios de tratamiento y almacenamiento temporal de los productos petrolíferos.

### **3.1.1.1 Plataformas tipo Jacket.**

Como ya se ha mencionado, las plataformas tipo Jacket son estructuras compuestas por perfiles tubulares que le brindan estabilidad frente a las condiciones climáticas. Poseen "patas" estructurales que van desde 3 hasta 12. Estas estructuras son comunes en proyectos que contemplan profundidades de 150-180m.<sup>45</sup> Se componen principalmente de 3 elementos.

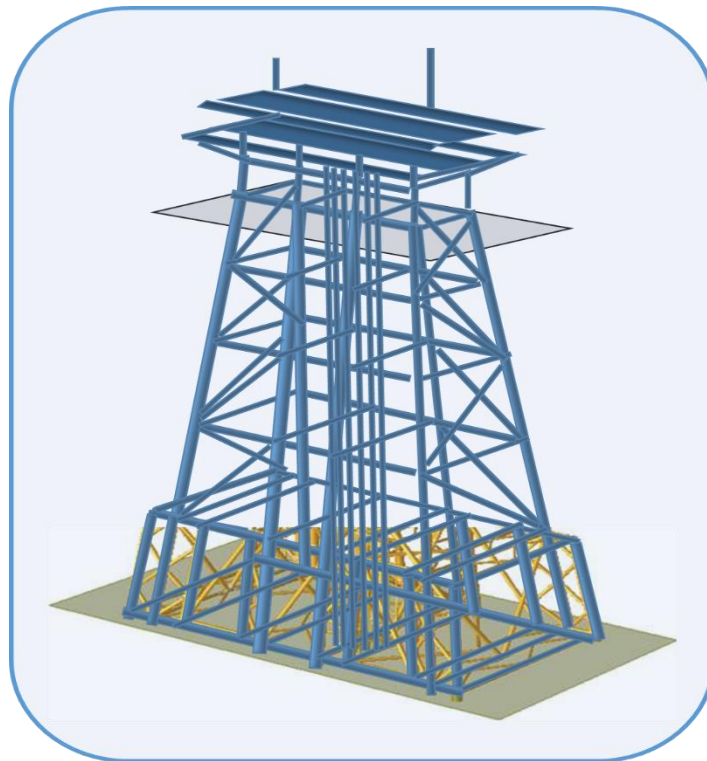
- **Cubierta:** Se encarga de soportar los equipos de producción y perforación según sea el caso. Las cubiertas pueden variar en su estructura y tipo de instalación dependiendo las necesidades del proyecto.

Los dos principales tipos de cubiertas son las modulares e integradas. Las cubiertas modulares son comúnmente usadas

cuando la construcción en sitio es poco factible, por lo que los módulos son construidos fuera de la plataforma y posteriormente son montados en la plataforma.

Por otra parte, las cubiertas integradas son construidas como una sola pieza o como módulos soportados por una red los cuales son construidos en sitio debido a que los equipos y herramientas necesarias para esto se encuentran disponibles. Posteriormente la cubierta integrada se monta como una sola pieza.

- Jacket/Torre: La torre o Jacket es la estructura de acero que brinda soporte a la cubierta y a todas las demás sub-estructuras presentes en la plataforma. La torre está conformada principalmente por las piernas, los tirantes, juntas, etc.
- Base: La base está conformada por los pilotes los cuales anclan la torre al suelo marino, con el fin de proveer de rigidez y resistencia a toda la estructura de acero.<sup>45</sup>



*Figura 35. Estructura tipo Jacket.*

### **3.2 Definición del caso de estudio**

Todos los proyectos de ingeniería son un esfuerzo temporal con un objetivo y alcance determinado, dan como resultado la creación de un producto único. El punto de inicio de cualquier proyecto es la ingeniería conceptual donde se define un proyecto como una idea con nulo o poco desarrollo y proporciona la información necesaria para un análisis de factibilidad preliminar.<sup>46</sup>

Algunas de las actividades que se definen de manera preliminar en esta fase son:

- La capacidad deseada.
- La ubicación preliminar.
- Estimado de costos clase V.
- Previsiones.<sup>47</sup>

Para este caso de estudio la ingeniería conceptual contempla la instalación de una plataforma de producción con equipo de separación la cual recibirá una mezcla de aceite y gas para su separación, además de contar con el espacio y la capacidad para recibir los servicios auxiliares. Los documentos de salida necesarios para el desarrollo de la ingeniería básica fueron:

- Bases de usuario finales aprobadas incluyendo composición de la mezcla de hidrocarburos de la plataforma de producción y condiciones operativas.
- Estudio de mecánica de suelos de la localización de la plataforma de enlace y habitacional.
- Información técnica referente a la ubicación de la plataforma de producción (tirante de agua, coordenadas UTM, orientación geográfica).

- Plano de localización de la nueva plataforma en el cual se deberá indicar la llegada de los ductos y sus características.
- Características de las barcasas que serán empleadas en el diseño de las maniobras de carga y transporte.
- Características del barco grúa encargado de la instalación.
- Características de los martillos para el hincado de los pilotes.
- Planos de localización y diagramas de tubería e instrumentación de la plataforma de enlace y habitacional.<sup>48</sup>

El siguiente paso es la ingeniería básica la cual establece las bases del diseño del proyecto y profundiza en todos los aspectos que se desarrollaron en la ingeniería conceptual por lo que en esta etapa se recopila una gran cantidad de información.<sup>46,48</sup>

Algunas de las actividades que se realizan en esta fase son:

- Estudio de las instalaciones físicas.
- Revisión de planos y diagramas.
- Dimensionamiento de equipos
- Cálculos preliminares de diseño
- Lista preliminar de equipos.
- Estudio de selección de proveedores.<sup>47</sup>

El proyecto del cual se realizará la evaluación tuvo como alcance:

- El desarrollo de la ingeniería básica de una plataforma tipo tetrápodo convencional de producción y puente de enlace con equipo de proceso de separación de aceite y gas con una capacidad para 200 Mbd de aceite y 300 MMpcd de gas.
- Se considera el diseño de la ingeniería básica del sistema de endulzamiento de gas.
- Se considera la segregación de las corrientes en la plataforma enlace para independizar las llegadas a un nuevo cabezal de mezcla.

- Se considera el diseño del cabezal de mezcla para el proceso de separación.
- Se considera el diseño de la salida de aceite del separador al cabezal en la plataforma de producción.
- Se considera el diseño del quemador de gas inclinado con apoyo en la estructura de la plataforma.
- Se considera el desarrollo de la ingeniería básica del puente de enlace entre la plataforma y el enlace, considerando los espacios suficientes y la capacidad de carga para el tránsito del personal y para soportar los cabezales de proceso y servicios auxiliares obre puentes.
- Se considera el diseño de las líneas de servicios auxiliares sobre puentes (agua potable, diésel, aguas negras, ductos eléctricos y ductos de telecomunicaciones.) de la plataforma habitacional a la plataforma de producción.
- Se considera dentro del desarrollo de la ingeniería básica las válvulas de corte de entrada y salida de las líneas.<sup>47</sup>

### **3.2.1 Ingeniería Básica**

Las especialidades que participaron en el desarrollo de la ingeniería básica del caso de estudio que se evaluará son; ingeniería de proceso e ingeniería de sistemas y sus actividades a realizar son las siguientes:

Bases de diseño.

- Bases de diseño.

Ingeniería de Proceso.

- Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.

- Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.
- Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.
- Balance de materia y energía e información complementaria de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.
- Balance de materia y energía e información complementaria de la planta potabilizadora de agua.
- Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de desfogue.
- Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de interconexión.
- Descripción del proceso.
- Criterios de diseño.
- Diagrama de flujo de proceso del sistema de endulzamiento de gas.
- Diagrama de flujo de proceso del sistema de separación de aceite y gas.
- Diagrama de flujo de proceso de acondicionamiento de gas amargo.
- Diagrama de flujo de proceso de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.
- Diagrama de flujo de proceso de planta potabilizadora de agua.
- Diagrama de flujo de proceso de sección de desfogue.
- Diagrama de flujo de proceso del sistema de interconexión.
- Especificación y cuestionario técnico del separador de primera etapa (Bifásico).
- Especificación y cuestionario técnico del sistema de endulzamiento de gas.
- Especificación y cuestionario técnico del depurador de gas amargo.
- Especificación y cuestionario técnico de la planta de tratamiento de aguas amargas y aceitosas.

- Filosofías básicas de operación.
- Hoja de datos del antiespumante.
- Hoja de datos de asfaltenos.
- Hoja de datos del inhibidor de corrosión.
- Hoja de datos del separador primera etapa.
- Hoja de datos del depurador de gas.
- Lista de equipo.
- Requerimientos de servicios auxiliares y agentes químicos.

#### Ingeniería de Sistemas.

- Descripción lógica operacional.
- Plano de notas generales, leyendas y símbolos.
- Plano de localización general del equipo, plataforma de producción cubierta inferior, elevación 19.100 metros.
- Plano de localización general del equipo, plataforma de producción, cubierta superior, elevación 27.939 metros.
- Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma de enlace.
- Plano de localización general de equipo cubierta superior, elevación 26.518 metros. Plataforma de enlace.
- Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma habitacional.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 1.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 2.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de acondicionamiento de gas amargo. Plataforma de producción. PB-LIT-T.



- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de aceite. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de gas. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de regeneración. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de separación de aceite y gas. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel limpio. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel sucio. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento e inyección de antiespumante e inhibidor de corrosión. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua de servicios. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua potable. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de inyección de asfaltenos. Plataforma de producción.

- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes de agua pluvial y drenajes atmosféricos. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes presurizados. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de desfogue y quemador. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas aceitosas. Plataforma de producción.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace.
- Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace (líneas por puente).
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua de servicio en plataforma habitacional.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua potable en plataforma habitacional.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de diésel limpio en plataforma habitacional.
- Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas negras. Plataforma de producción.
- Especificación técnica y cuestionario técnico de quemador.
- Especificación técnica y cuestionario técnico de arrestadores de flama.
- Especificación técnica y cuestionario técnico de boquillas de inyección de químicos.

- Especificación técnica y cuestionario técnico de filtros de servicio.
- Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas aceitosas.
- Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas negras.
- Especificación técnica y cuestionario técnico de válvulas de seguridad.
- Especificación del paquete depurador de gas.
- Hoja de datos de los arrestadores de flama.
- Hoja de datos de boquillas de inyección de químicos.
- Hojas de datos del quemador.
- Hojas de datos, bombas (diésel e inyección de químicos).
- Hojas de datos, bombas (condensados de desfogue).
- Hojas de datos, filtros de servicios.
- Hojas de datos, recipientes de servicios.
- Hojas de datos, válvulas de control de nivel, presión y flujo.
- Hojas de datos, válvulas de seguridad.
- Hojas de datos del tanque de desfogue.
- Índice de servicios (clasificación de materiales de tubería por servicio).
- Lista de líneas de proceso.
- Lista de líneas de servicios auxiliares.
- Estudio de análisis de capacidades de servicios auxiliares de la plataforma habitacional (agua potable, agua de servicios y diésel).
- Memoria de cálculo de líneas de proceso.
- Memoria de cálculo de líneas de servicios.
- Memoria de cálculo de válvulas de control y válvulas de seguridad.
- Memoria de cálculo del sistema de desfogue.
- Estudio de radiación.
- Estudio técnico de válvulas

- Sumario de equipo (lista de pesos).
- Análisis hidráulico de los ductos de transporte.

El siguiente paso es la ingeniería de detalle la cual tiene como objetivo obtener todo lo relacionado al diseño detallado necesario para proceder a la construcción. En esta etapa se debe tener en cuenta que toda la información generada será clave para la adquisición y construcción de los equipos e instalaciones necesarias.<sup>46,47,48</sup>

Típicamente en esta etapa se concluyen las especificaciones, se emiten las ordenes de compras faltantes, se concluyen los cálculos de los sistemas mecánicos e hidráulicos, se revisa la ingeniería básica, se concluyen los planos necesarios para construcción (rutas de tuberías, de disposición de equipo, diagramas de proceso, etc.).<sup>47</sup>

Concluida la ingeniería de detalle se procede a realizar las actividades de construcción que se esbozan en la figura 36.

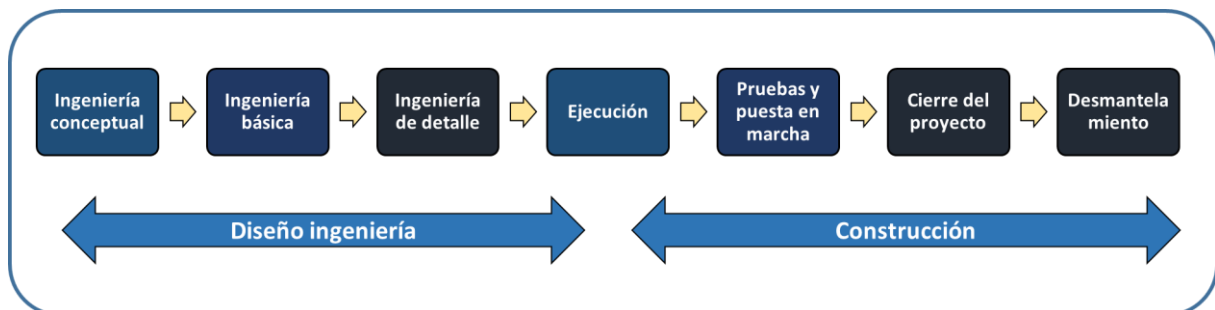


Figura 36. Ciclo de vida de un proyecto.

### 3.2.2 Programa Resumido del Proyecto.

El programa resumido del proyecto muestra las etapas básicas en las que se puede descomponer el proyecto. Se puede observar que el proyecto tiene una duración preliminar de 56 días.

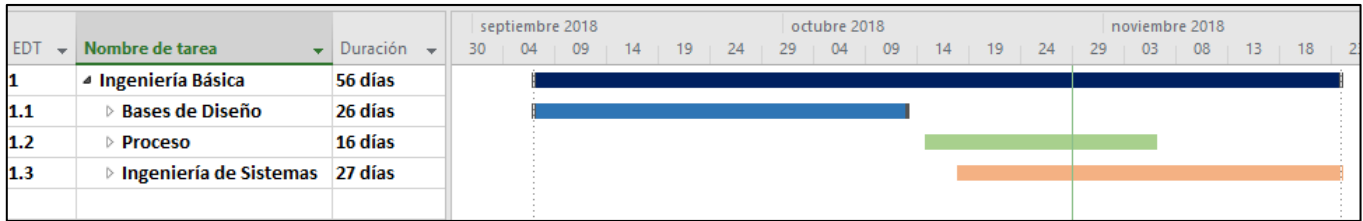
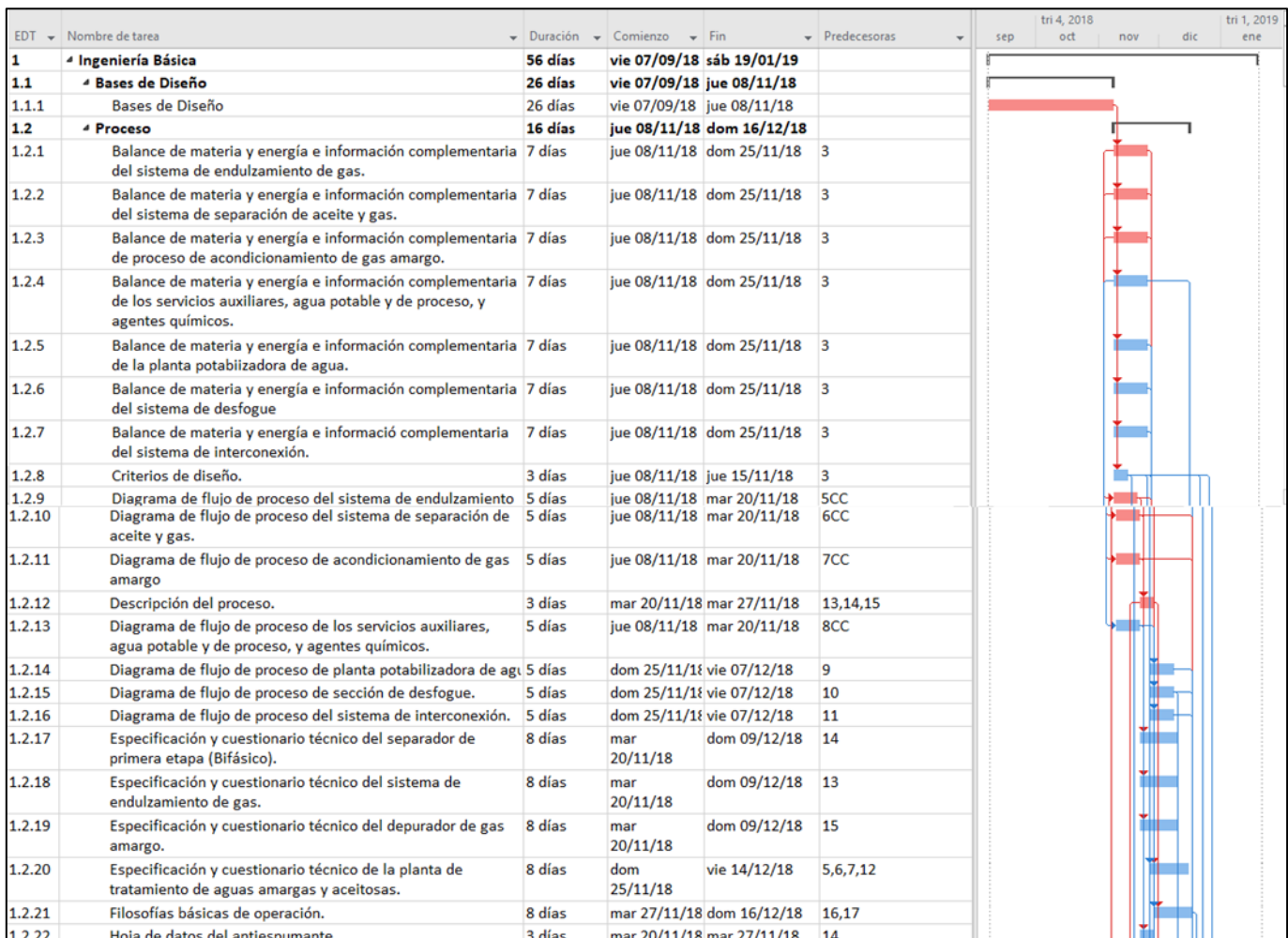


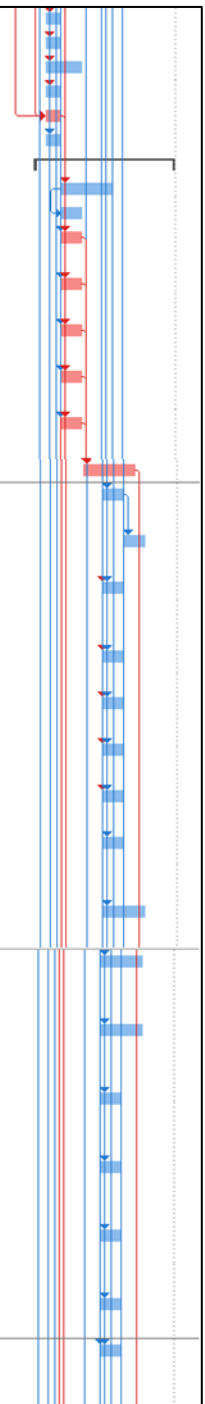
Figura 37. Programa Resumido.

### 3.2.3 Programa Detallado del Proyecto.

En el programa detallado del proyecto se muestran las actividades que componen cada una de las disciplinas del proyecto (véase sección 3.2.1). Así como la ruta crítica identificada con la duración en rojo para las actividades que la componen. El software utilizado para el manejo de las actividades fue Project® de Microsoft en su versión profesional 2016.



1.2.23	Hoja de datos de asfaltenos.	3 días	mar 20/11/18	mar 27/11/18	14
1.2.24	Hoja de datos del inhibidor de corrosión.	3 días	mar 20/11/18	mar 27/11/18	13
1.2.25	Hoja de datos del separador primera etapa.	7 días	mar 20/11/18	vie 07/12/18	14
1.2.26	Hoja de datos del depurador de gas.	3 días	mar 20/11/18	mar 27/11/18	15
1.2.27	Lista de equipo.	3 días	mar 20/11/18	mar 27/11/18	13CC,14CC,15CC,16CC
1.2.28	Requerimientos de servicios auxiliares y agentes químicos.	3 días	mar 20/11/18	mar 27/11/18	17
<b>1.3</b>	<b>4 Ingeniería de Sistemas</b>	<b>27 días</b>	<b>jue 15/11/18</b>	<b>sáb 19/01/19</b>	
1.3.1	Descripción lógica operacional.	10 días	mar 27/11/18	vie 21/12/18	16
1.3.2	Plano de notas generales, leyendas y símbolos.	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	34CC
1.3.3	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción cubierta inferior, elevación 19.100 metros.	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,17,9,31
1.3.4	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción, cubierta superior, elevación 27.939 metros.	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,17,9,31
1.3.5	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma de enlace.	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,17,9,31
1.3.6	Plano de localización general de equipo cubierta superior, elevación 26.518 metros. Plataforma de enlace.	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,17,9,31
1.3.7	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma habitacional	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,17,9,31
1.3.8	Análisis hidráulico de los ductos de transporte.	10 días	vie 07/12/18	lun 31/12/18	36,37,38,39,40
1.3.9	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 1.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25
1.3.10	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 2.	4 días	mié 26/12/18	vie 04/01/19	42
1.3.11	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de acondicionamiento de gas amargo. Plataforma de producción. PB-LIT-T.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	15,25
1.3.12	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de aceite. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	14,25
1.3.13	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de gas. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	14,25
1.3.14	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de regeneración. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	14,25
1.3.15	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de separación de aceite y gas. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	14,25
1.3.16	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25
1.3.17	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de	8 días	dom 16/12/18	vie 04/01/19	25
1.3.18	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel sucio. Plataforma de producción.	8 días	dom 16/12/18	vie 04/01/19	25
1.3.19	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento e inyección de antiespumante e inhibidor de corrosión. Plataforma de	8 días	dom 16/12/18	vie 04/01/19	25
1.3.20	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua de servicios. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25
1.3.21	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua potable. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25
1.3.22	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25
1.3.23	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de inyección de asfaltenos. Plataforma	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25
1.3.24	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes de agua pluvial y drenajes atmosféricos. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	18,25



1.3.25	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes presurizados. Plataforma de	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	18,25	
1.3.26	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de desfogue y quemador. Plataforma de	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	19,25	
1.3.27	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas aceitosas. Plataforma de producción.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	8,25	
1.3.28	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25,20	
1.3.29	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace (líneas por puente).	4 días	mié 26/12/18	vie 04/01/19	61	
1.3.30	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua de servicio en plataforma habitacional.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	8,25	
1.3.31	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua potable en plataforma habitacional.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25,20	
1.3.32	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de diésel limpio en plataforma habitacional.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	25,20	
1.3.33	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas negras. Plataforma de producción	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	8,25	
1.3.34	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas aceitosas.	8 días	jue 15/11/18	mar 04/12/18	12	
1.3.35	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas negras.	8 días	jue 15/11/18	mar 04/12/18	12	
1.3.36	Especificación del paquete depurador de gas.	8 días	mar 27/11/18	dom 16/12/18	16	
1.3.37	Hojas de datos, bombas (diésel e inyección de químicos).	2 días	mar 20/11/18	dom 25/11/18	17	
1.3.38	Hojas de datos, bombas (condensados de desfogue).	2 días	vie 07/12/18	mar 11/12/18	19	
1.3.39	Hojas de datos, filtros de servicios.	2 días	mar 20/11/18	dom 25/11/18	17	
1.3.40	Hojas de datos, recipientes de servicios	2 días	mar 20/11/18	dom 25/11/18	17	
1.3.41	Especificación técnica y cuestionario técnico de filtros de servicio.	4 días	dom 25/11/18	mar 04/12/18	72,12	
1.3.42	Hojas de datos del tanque de desfogue.	2 días	mar 20/11/18	dom 25/11/18	17	
1.3.43	Lista de líneas de proceso.	4 días	lun 31/12/18	mié 09/01/19	41	
1.3.44	Índice de servicios (clasificación de materiales de tubería por servicio).	4 días	mié 09/01/19	sáb 19/01/19	76	
1.3.45	Lista de líneas de servicios auxiliares.	4 días	lun 31/12/18	mié 09/01/19	41	
1.3.46	Estudio de análisis de capacidades de servicios auxiliares de la plataforma habitacional (agua potable, agua de servicio y	8 días	jue 15/11/18	mar 04/12/18	12	
1.3.47	Memoria de cálculo de líneas de proceso.	4 días	mié 09/01/19	sáb 19/01/19	76	
1.3.48	Memoria de cálculo de líneas de servicios.	4 días	mié 09/01/19	sáb 19/01/19	76	
1.3.49	Memoria de cálculo del sistema de desfogue.	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,13	
1.3.50	Estudio de radiación.	8 días	mar 27/11/18	dom 16/12/18	5,6,7,12,16	
1.3.51	Estudio técnico de válvulas.	8 días	mar 27/11/18	dom 16/12/18	16	
1.3.52	Sumario de equipo (lista de pesos).	4 días	mar 27/11/18	vie 07/12/18	16,12	
1.3.53	Memoria de cálculo de válvulas de control y válvulas de seguridad.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	84	
1.3.54	Hojas de datos, válvulas de seguridad.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	84	
1.3.55	Hojas de datos, válvulas de control de nivel, presión y flujo.	4 días	dom 16/12/18	mié 26/12/18	84	
1.3.56	Hojas de datos de los arrestadores de flama.	2 días	dom 16/12/18	vie 21/12/18	84	
1.3.57	Hoja de datos de boquillas de inyección de químicos.	2 días	dom 16/12/18	vie 21/12/18	84	
1.3.58	Hojas de datos del quemador.	2 días	dom 16/12/18	vie 21/12/18	84	
1.3.59	Especificación técnica y cuestionario técnico de válvulas de seguridad.	4 días	mié 26/12/18	vie 04/01/19	12,87	
1.3.60	Especificación técnica y cuestionario técnico de boquillas de inyección de químicos.	4 días	vie 21/12/18	lun 31/12/18	90,12	
1.3.61	Especificación técnica y cuestionario técnico de arrestadores de flama.	2 días	vie 21/12/18	mié 26/12/18	83,89	
1.3.62	Especificación técnica y cuestionario técnico de quemador.	10 días	vie 21/12/18	lun 14/01/19	83,91	

Figura 38. Programa detallado del proyecto.

### **3.2.4 Riesgos.**

Como riesgos entendemos a todos aquellos eventos desconocidos que en caso de ocurrir producirían un efecto positivo o negativo en los objetivos del proyecto.<sup>1</sup> La identificación y administración de los riesgos dentro de un proyecto resultan prácticas esenciales para hacer frente a los retos actuales que obstaculizan los proyectos.<sup>49</sup>

La identificación de los riesgos consta de determinar cuáles eventos podrían impactar el proyecto, así mismo, en esta etapa se documenta como son las características y consecuencias de los riesgos identificados, posteriormente y tomando en cuenta las propiedades de los riesgos identificados, se realizan análisis cuantitativos de los mismos con el fin de establecer niveles de prioridad de acuerdo a su efecto.<sup>49</sup>

La identificación de los riesgos puede realizarse por varias técnicas como son la lluvia de ideas, checklists, técnica Delphi, análisis de escenarios, etc. Sin embargo, algunos autores concluyen que la técnica más utilizada en la actualidad es la lluvia de ideas.<sup>50</sup>

Posterior a la identificación llega la etapa de "valoración" con el fin de entender que tan probable es que algo salga mal y en dado caso de que así sea, cuál será el impacto asociado.<sup>51</sup> Una de las técnicas usadas para esta categorización es la matriz de valoración de riesgos, con la cual es posible integrar el impacto y la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los riesgos que se identificaron previamente.<sup>49,51</sup>



Prob/Impa	Despreciable D	Menor Me	Moderado Mo	Serio S	Crítico C
0-10%	B	B	B	M	M
11-40%	B	B	M	M	A
41-60%	B	M	M	M	A
61-90%	M	M	M	M	A
91-100%	M	A	A	A	A

	Probabilidad		
Impacto	Baja	Media	Alta
Bajo	BI-BP	BI-MP	BI-AP
Medio	MI-BP	MI-MP	MI-AP
Alto	AI-BP	AI-MP	AI-AP

Figura 39. Ejemplos de matrices de valoración de riesgos.

Los posibles riesgos que se pueden encontrar dentro de un proyecto son de distintas índoles abarcando desde los riesgos operacionales y de tecnología hasta los riesgos sociales y culturales de la región en la que se plantea el proyecto.<sup>51</sup> Por otra parte, los riesgos difieren de proyecto a proyecto, en el caso de las plataformas offshore es bien sabido que los riesgos técnicos son mucho mayores que los riesgos sociales debido a su ubicación lejos de la población general y a que son socialmente aceptadas debido a la ventajas económicas que representan.<sup>52</sup> Los riesgos presentes en un proyecto de este tipo son:

- Técnicos
  - Submarino-dinámicos
  - Submarino-estáticos
  - Superficie.
  - Infraestructura
  - Tecnológicos
  - Operabilidad
  - Disponibilidad
  - Integridad
  - Sustentabilidad
- Salud, seguridad y ambiente.
- Mantenimiento
- Económicos
  - Costo del proyecto.
  - Perfil del costo de las fases.
  - Método de evaluación.
  - Capacidad.

- Modelos económicos.
- Costos de redimensionamiento.
- Comerciales
  - Contratos y Procuración
  - Financieros
  - Controles comerciales.
  - Legales
  - Competencia
  - Marketing
  - Responsabilidades
  - Acuerdos de colaboración.
- Organizacionales
  - Estructura
  - Recursos
  - Competencias
  - Procedimientos
- Controles de proyecto
- Administración
- IT y sistemas
- Interface
- Gobierno
- Colaboración
- Políticos
  - Gobierno
  - Stakeholders
  - Empleo
  - Regulaciones
  - Seguridad
  - Reputación
  - Controles de exportación
  - Localización
  - Comunidad
  - Organizaciones no gubernamentales
- NTR (Non-technical risks)

#### **3.2.4.1 Riesgos para la evaluación.**

La evaluación de nuestro caso de estudio se hará mediante el uso de métodos estadísticos que requieren del conocimiento de variables, como la incertidumbre asociada a las tareas, por lo que es necesario tomar en cuenta los riesgos que pueden impactar directamente en el desarrollo de las actividades, esto deriva en la necesidad de identificar dos tipos de riesgos específicos, los riesgos organizacionales y los riesgos técnicos de ingeniería que pueden suceder durante la etapa de la ingeniería básica.

- 1) Riesgos Organizacionales: son aquellos que involucran falta de comunicación y coordinación dentro del proyecto, también, incluyen los riesgos asociados a la productividad y la planeación del mismo proyecto.
- 2) Riesgos técnicos de ingeniería: están asociados a un mal diseño, un alcance incompleto de los entregables, especificaciones inadecuadas y discordancias entre valores obtenidos y suposiciones.<sup>51</sup>

Para evaluar el caso de estudio se propusieron los siguientes riesgos tanto organizacionales como técnicos de ingeniería que se podrían encontrar en el desarrollo de las actividades de la ingeniería básica.

Riesgos Organizacionales		Riesgos de Ingeniería.	
R.O.1	Fallas en la comunicación	R.I.1	Fallas en el diseño
R.O.2	Fallas en la coordinación	R.I.2	Fallas en el alcance
R.O.3	Fallas en la productividad	R.I.3	Fallas en las especificaciones
R.O.4	Fallas en la planeación		

*Figura 40. Riesgos Organizacionales y de Ingeniería.*

Los riesgos identificados fueron evaluados para cada una de las actividades del proyecto mediante una matriz de riesgos la cual se encuentra en el apéndice "Matriz de riesgos".

Los criterios tomados para la evaluación son los siguientes:

- En las tareas críticas se tomará un criterio más cauto con el fin de proteger la cadena y así evitar un retraso en el proyecto completo.
- El posible impacto de los riesgos identificados repercutirá de forma directa en la duración de las actividades.
- Se deberá tener un criterio similar para las actividades de la misma índole.

- Una vez evaluados los riesgos en cada una de las tareas se deberán “calcular” los índices de riesgo con el fin de obtener una visión completa de todos los posibles escenarios.
- Posteriormente se deberá ponderar cada uno de los riesgos con el fin de obtener un índice de riesgo “global” que represente a esa actividad tomando en cuenta los índices de riesgo individuales.
- El índice de riesgo “global” representará el escenario más probable para la duración de nuestras actividades, el escenario optimista será la duración asignada en primer lugar a la tarea y el escenario pesimista será tomado de la matriz de riesgo usando la condición de mayor impacto con mayor probabilidad teniendo prioridad de elección aquel escenario que muestre un mayor impacto.

En la figura 41 se muestra un ejemplo de la matriz realizada para la evaluación de los riesgos de cada una de las tareas tomando en cuenta los valores establecidos en la figura 42. En el apéndice “Matriz de riesgos” se presenta de forma completa las matrices realizadas.

	Impacto						
	Riesgos Operacionales				Riesgos de Ingeniería		
Nombre de tarea	R.O.1	R.O.2	R.O.3	R.O.4	R.I.1	R.I.2	R.I.3
<b>Ingeniería Básica</b>							
<b>Bases de Diseño</b>							
Bases de Diseño	4	3	3	4	5	5	4
<b>Proceso</b>							
Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.	3	2	3	3	4	5	5
Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.	2	2	2	2	3	3	3
Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.	2	2	2	2	3	3	3

Figura 41. Ejemplo de matriz de riesgo.

Impacto				Probabilidad		
5	<b>C</b>	Crítico	20%	4	Seria	61-100%
4	<b>S</b>	Serio	20%-15%	3	Moderada	41-60%
3	<b>Mo</b>	Moderado	15-10%	2	Menor	11-40%
2	<b>Me</b>	Menor	10-5%	1	Despreciable	0-10%
1	<b>D</b>	Despreciable	5%			

*Figura 42. Criterios de Evaluación.*

En la figura 43 se muestra los valores obtenidos para la evaluación de las duraciones de las actividades los cuales serán utilizados en la evaluación.

EDT	Nombre de tarea	Optimista	Más probable	Pesimista
<b>1</b>	<b>Ingeniería Básica</b>			
<b>1.1</b>	<b>Bases de Diseño</b>			
<b>1.1.1</b>	<b>Bases de Diseño</b>	<b>26</b>	<b>30.6</b>	<b>33.8</b>
<b>1.2</b>	<b>Proceso</b>			
1.2.1	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.	7	8.3	9.1
1.2.2	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.	7	7.6	8.1
1.2.3	Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.	7	7.6	8.1
1.2.4	Balance de materia y energía e información complementaria de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.	7	7.6	8.1
1.2.5	Balance de materia y energía e información complementaria de la planta potabilizadora de agua.	7	7.6	8.1
1.2.6	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de desfogue	7	7.6	8.1
1.2.7	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de interconexión.	7	7.6	8.1
1.2.8	Descripción del proceso.	3	3.6	3.9
1.2.9	Criterios de diseño.	3	3.4	3.6
1.2.10	Diagrama de flujo de proceso del sistema de endulzamiento de gas.	5	5.9	6.5
1.2.11	Diagrama de flujo de proceso del sistema de separación de aceite y gas.	5	5.9	6.5
1.2.12	Diagrama de flujo de proceso de acondicionamiento de gas amargo	5	5.7	6.0
1.2.13	Diagrama de flujo de proceso de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.	5	5.7	6.0
1.2.14	Diagrama de flujo de proceso de planta potabilizadora de agua.	5	5.7	6.0
1.2.15	Diagrama de flujo de proceso de sección de desfogue.	5	5.7	6.0
1.2.16	Diagrama de flujo de proceso del sistema de interconexión.	5	5.7	6.0
1.2.17	Especificación y cuestionario técnico del separador de primera etapa (Bifásico).	8	9	9.2
1.2.18	Especificación y cuestionario técnico del sistema de endulzamiento de gas.	8	9	9.2
1.2.19	Especificación y cuestionario técnico del depurador de gas amargo.	8	9	9.2
1.2.20	Especificación y cuestionario técnico de la planta de tratamiento de aguas amargas y aceitosas.	8	9	9.2
1.2.21	Filosofías básicas de operación.	8	9	9.6
1.2.22	Hoja de datos del antiespumante.	3	3.4	3.6
1.2.23	Hoja de datos de asfaltenos.	3	3.4	3.6
1.2.24	Hoja de datos del inhibidor de corrosión.	3	3.4	3.6
1.2.25	Hoja de datos del separador primera etapa.	7	7.9	8.4
1.2.26	Hoja de datos del depurador de gas.	3	3.4	3.6
1.2.27	Lista de equipo.	3	3.4	3.6
1.2.28	Requerimientos de servicios auxiliares y agentes químicos.	3	3.4	3.5
<b>1.3</b>	<b>Ingeniería de Sistemas</b>			
1.3.1	Análisis hidráulico de los ductos de transporte.	10	11.3	11.5
1.3.2	Descripción lógica operacional.	10	11.3	11.5
1.3.3	Plano de notas generales, leyendas y símbolos.	4	4.3	4.6
1.3.4	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción cubierta inferior, elevación 19.100 metros.	4	4.5	4.8
1.3.5	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción, cubierta superior, elevación 27.939 metros.	4	4.5	4.8
1.3.6	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma de enlace.	4	4.5	4.8
1.3.7	Plano de localización general de equipo cubierta superior, elevación 26.518 metros. Plataforma de enlace.	4	4.5	4.8

1.3.8	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma habitacional	4	4.5	4.8
1.3.9	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 1.	4	4.5	4.8
1.3.10	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 2.	4	4.5	4.8
1.3.11	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de acondicionamiento de gas amargo. Plataforma de producción. PB-LIT-T.	4	4.5	4.8
1.3.12	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de aceite. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.13	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de gas. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.14	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de regeneración. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.15	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de separación de aceite y gas. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.16	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.17	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel limpio. Plataforma de producción	8	9	9.6
1.3.18	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel sucio. Plataforma de producción.	8	9	9.6
1.3.19	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento e inyección de antiespumante e inhibidor de corrosión. Plataforma de producción.	8	9	9.6
1.3.20	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua de servicios. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.21	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua potable. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.22	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.23	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de inyección de asfaltenos. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.24	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes de agua pluvial y drenajes atmosféricos. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.25	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes presurizados. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.26	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de desfogue y quemador. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.27	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas aceitosas. Plataforma de producción.	4	4.5	4.8
1.3.28	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace.	4	4.5	4.8
1.3.29	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace (líneas por puente).	4	4.5	4.8
1.3.30	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua de servicio en plataforma habitacional.	4	4.5	4.8
1.3.31	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua potable en plataforma habitacional.	4	4.5	4.8

1.3.32	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de diésel limpio en plataforma habitacional.	4	4.5	4.8
1.3.33	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas negras. Plataforma de producción	4	4.5	4.8
1.3.34	Especificación técnica y cuestionario técnico de quemador.	10	11.8	13
1.3.35	Especificación técnica y cuestionario técnico de arrestadores de flama.	2	2.3	2.3
1.3.36	Especificación técnica y cuestionario técnico de boquillas de inyección de químicos.	4	4.5	4.6
1.3.37	Especificación técnica y cuestionario técnico de filtros de servicio.	4	4.5	4.6
1.3.38	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas aceitosas.	8	9	9.2
1.3.39	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas negras.	8	9	9.2
1.3.40	Especificación técnica y cuestionario técnico de válvulas de seguridad.	4	4.5	4.6
1.3.41	Especificación del paquete depurador de gas.	8	9	9.2
1.3.42	Hojas de datos de los arrestadores de flama.	2	2.3	2.4
1.3.43	Hoja de datos de boquillas de inyección de químicos.	2	2.3	2.4
1.3.44	Hojas de datos del quemador.	2	2.4	2.6
1.3.45	Hojas de datos, bombas (diésel e inyección de químicos).	2	2.3	2.4
1.3.46	Hojas de datos, bombas (condensados de desfogue).	2	2.3	2.4
1.3.47	Hojas de datos, filtros de servicios.	2	2.3	2.4
1.3.48	Hojas de datos, recipientes de servicios	2	2.3	2.4
1.3.49	Hojas de datos, válvulas de control de nivel, presión y flujo.	4	4.5	4.8
1.3.50	Hojas de datos, válvulas de seguridad.	4	4.5	4.8
1.3.51	Hojas de datos del tanque de desfogue.	2	2.3	2.4
1.3.52	Índice de servicios (clasificación de materiales de tubería por servicio).	4	4.5	4.6
1.3.53	Lista de líneas de proceso.	4	4.5	4.6
1.3.54	Lista de líneas de servicios auxiliares.	4	4.5	4.6
1.3.55	Estudio de análisis de capacidades de servicios auxiliares de la plataforma habitacional (agua potable, agua de servicio y diesel).	8	9	9.2
1.3.56	Memoria de cálculo de líneas de proceso.	4	4.3	4.6
1.3.57	Memoria de cálculo de líneas de servicios.	4	4.3	4.6
1.3.58	Memoria de cálculo de válvulas de control y válvulas de seguridad.	4	4.3	4.6
1.3.59	Memoria de cálculo del sistema de desfogue.	4	4.3	4.6
1.3.60	Estudio de radiación.	8	9	9.2
1.3.61	Estudio técnico de válvulas.	8	9.4	10.4
1.3.62	Sumario de equipo (lista de pesos).	4	4.5	4.6

Figura 43. Actividades con duraciones (pesimista, más probable y optimista).



### **3.3 Aplicación del método de la Cadena Crítica.**

#### **3.3.1 Generalidades**

Para realizar la evaluación del programa mediante el método de la cadena crítica fue necesario modificarlo siguiendo los criterios de evasión de la asignación de multitareas, además de tomarse en cuenta los riesgos dados en la sección 3.2.4.1. Se obtuvo que la duración del proyecto podría tener tres resoluciones posibles distintas al caso inicial en el que solo se encontraba programada la ruta crítica.

- Caso optimista de la evaluación: 83 días de duración.
- Caso más probable de la evaluación: 94 días de duración.
- Caso pesimista de la evaluación: 101.3 días de duración.

Se asignaron los colaboradores que realizarán las actividades del programa obteniéndose 6 ingenieros encargados de las actividades de proceso y bases de diseño, y 12 ingenieros encargados de las actividades de Sistemas.

El reacomodo de las tareas realizado para evitar la asignación de multitareas se realizó con la ayuda de la herramienta de "reprogramar a una fecha disponible" del software MS Project® teniendo como preferencia reprogramar en lo antes posible.

La asignación de los recursos se hizo de manera manual buscando evitar que la reprogramación de las tareas diera como resultado la división de la actividad en varias partes debido a la posible emulación de una asignación multitareas.

Para el dimensionamiento de los buffers se usó el software MS Excel® en su versión profesional 2016.

Solamente se programaron las tareas críticas y las pertenecientes a las cadenas de alimentación ya que solo estas tienen la capacidad de

modificar de manera directa la duración total del proyecto. La cadena crítica resultante de la evaluación y por lo tanto la duración del proyecto es de 83 días como caso base.

Se hará uso de las metodologías de dimensionamiento de buffer mencionadas en la sección 2.3.2.1 con el fin de mostrar los distintos escenarios posibles para emitir una recomendación.

### 3.3.2 Dimensionamiento de buffers.

#### 3.3.2.1 Dimensionamiento de buffers método 50%

El dimensionamiento del buffer por el método 50% se llevó acabo partiendo de las actividades de la cadena crítica propuesta y de la cadena de alimentación 1.

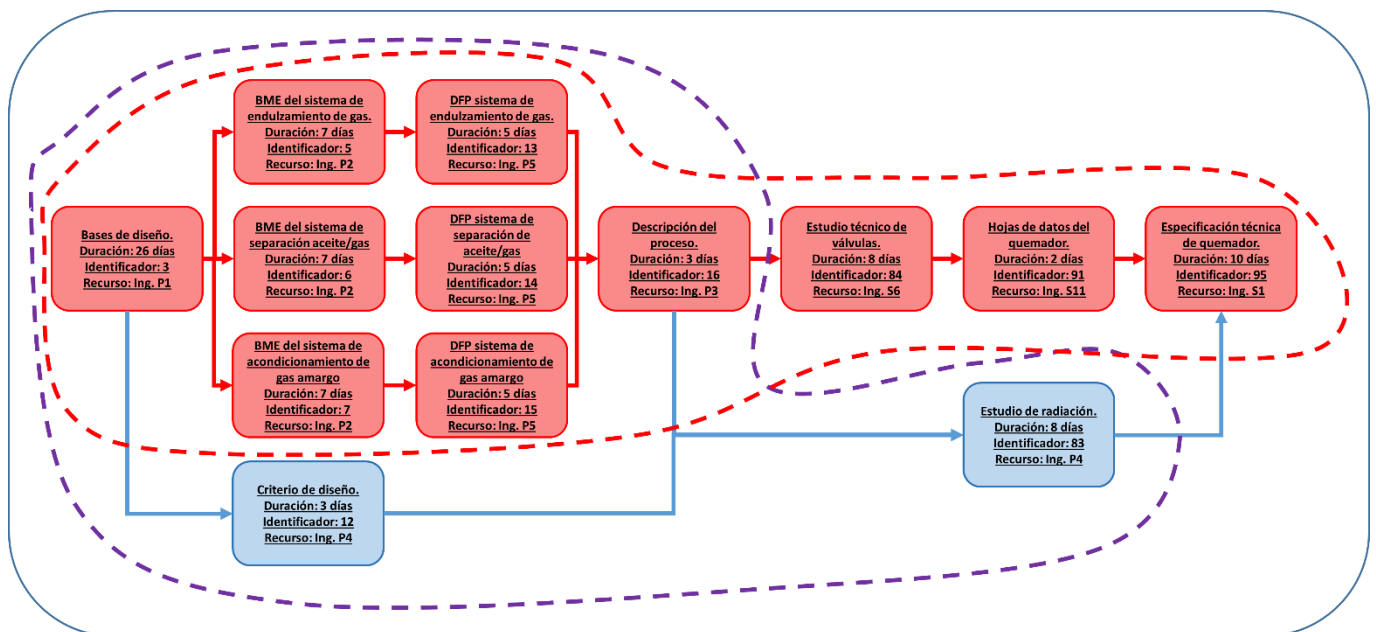


Figura 44. Cadena crítica y cadena de alimentación 1.

Se obtuvo un buffer de proyecto igual a 42.5 días y un buffer de alimentación igual a 38 días.

*Buffer de alimentación 1*

$$= \frac{D_{A3} + D_{A5} + D_{A6} + D_{A7} + D_{A12} + D_{A13} + D_{A14} + D_{A15} + D_{A16} + D_{A83}}{2}$$

$$= \frac{26 + 7 + 7 + 7 + 3 + 5 + 5 + 5 + 3 + 8}{2} = 38 \text{ Días.}$$

*Buffer del proyecto*

$$= \frac{D_{A3} + D_{A5} + D_{A6} + D_{A7} + D_{A13} + D_{A14} + D_{A15} + D_{A16} + D_{A84} + D_{A91} + D_{A95}}{2}$$

$$= \frac{26 + 7 + 7 + 7 + 5 + 5 + 5 + 3 + 8 + 2 + 10}{2} = 42.5 \text{ Días.}$$

### **3.3.2.2 Dimensionamiento de buffers método RSEM**

El dimensionamiento del buffer por el método RSEM de igual forma que en el método anterior se llevó a cabo partiendo de las actividades de la cadena crítica y la cadena de alimentación presentadas en la figura 44. Adicionalmente para usar este método es necesario establecer las duraciones de seguridad para cada una de las actividades dentro de las cadenas a analizar, anteriormente se estableció la duración "pesimista" para las tareas la cual fungirá como duración de seguridad para este método.

Se obtuvo un buffer de proyecto igual a 4.7 días y un buffer de alimentación igual a 4.4 días.

*Buffer de alimentación 1*

$$U_3 = S_{i3} - d_{i3} = 33.8 - 29.9 = 3.9$$

$$U_5 = S_{i5} - d_{i5} = 9.1 - 8.05 = 1.05$$

$$U_6 = S_{i6} - d_{i6} = 8.1 - 7.55 = 0.55$$

$$U_7 = S_{i7} - d_{i7} = 8.1 - 7.55 = 0.55$$

$$U_{12} = S_{i12} - d_{i12} = 3.6 - 3.3 = 0.3$$

$$U_{13} = S_{i13} - d_{i13} = 6.5 - 5.75 = 0.75$$

$$U_{14} = S_{i14} - d_{i14} = 6.5 - 5.75 = 0.75$$

$$U_{15} = S_{i15} - d_{i15} = 6 - 5.5 = 0.5$$

$$U_{16} = S_{i16} - d_{i16} = 3.9 - 3.45 = 0.45$$

$$U_{83} = S_{i83} - d_{i83} = 9.2 - 8.6 = 0.6$$

*Buffer de alimentación 1*

$$= \sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_6^2 + U_7^2 + U_{12}^2 + U_{13}^2 + U_{14}^2 + U_{15}^2 + U_{16}^2 + U_{83}^2}$$

$$= 4.4 \text{ Días.}$$

*Buffer del proyecto*

$$U_3 = S_{i3} - d_{i3} = 33.8 - 29.9 = 3.9$$

$$U_5 = S_{i5} - d_{i5} = 9.1 - 8.05 = 1.05$$

$$U_6 = S_{i6} - d_{i6} = 8.1 - 7.55 = 0.55$$

$$U_7 = S_{i7} - d_{i7} = 8.1 - 7.55 = 0.55$$

$$U_{13} = S_{i13} - d_{i13} = 6.5 - 5.75 = 0.75$$

$$U_{14} = S_{i14} - d_{i14} = 6.5 - 5.75 = 0.75$$

$$U_{15} = S_{i15} - d_{i15} = 6 - 5.5 = 0.5$$

$$U_{16} = S_{i16} - d_{i16} = 3.9 - 3.45 = 0.45$$

$$U_{84} = S_{i84} - d_{i84} = 10.4 - 9.2 = 1.2$$

$$U_{91} = S_{i91} - d_{i91} = 2.6 - 2.3 = 0.3$$

$$U_{95} = S_{i95} - d_{i95} = 13 - 11.5 = 1.5$$

*Buffer del proyecto*

$$= \sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_6^2 + U_7^2 + U_{13}^2 + U_{14}^2 + U_{15}^2 + U_{16}^2 + U_{84}^2 + U_{91}^2 + U_{95}^2}$$

$$= 4.7 \text{ Días.}$$

### 3.3.2.3 Dimensionamiento de buffers método APRT

El dimensionamiento del buffer por el método APRT se llevó acabo partiendo de las actividades de la cadena crítica y de la cadena de alimentación 1.

El método APRT depende de las incertidumbres asociadas a las tareas por lo que es necesario establecer los valores pesimista y optimista de las duraciones las cuales para nuestro caso de estudio fueron dadas en la sección 3.2.4.1 en la figura 43.

Tabla 6. Incertidumbres asociadas a las tareas cadena de alimentación 1.

Cadena de alimentación 1		
Id	Nombre	$\sigma$
3	Bases de diseño.	1.3
5	BME del sistema de endulzamiento de gas.	0.35
6	BME sistema de separación de aceite/gas.	0.183
7	BME sistema acondicionamiento gas amargo.	0.183
12	Criterios de diseño.	0.1
13	DFP del sistema de endulzamiento de gas.	0.25
14	DFP del sistema de separación de aceite/gas.	0.25
15	DFP sistema acondicionamiento gas amargo.	0.167
16	Descripción del proceso.	0.15
83	Estudio de radiación.	0.2
Incertidumbre de la cadena.		1.45

Tabla 7. Incertidumbres asociadas a las tareas cadena crítica.

Cadena crítica		
Id	Nombre	$\sigma$
3	Bases de diseño.	1.3
5	BME del sistema de endulzamiento de gas.	0.35
6	BME sistema de separación de aceite/gas.	0.183
7	BME sistema acondicionamiento gas amargo.	0.183
13	DFP del sistema de endulzamiento de gas.	0.25

14	DFP del sistema de separación de aceite/gas.	0.25
15	DFP sistema acondicionamiento gas amargo.	0.167
16	Descripción del proceso.	0.15
84	Estudio técnico de válvulas.	0.4
91	Hojas de datos del quemador.	0.1
95	Especificación técnica del quemador.	0.5
Incertidumbre de la cadena.		1.57

Al evaluar el proyecto utilizando un enfoque basado en la eliminación sistemática de la asignación de multitareas tendremos que tanto la libertad de los recursos como la demanda de los mismos será igual a uno en los cálculos del trabajo requerido (TR) y trabajo disponible (TD).

Tabla 8. Valores de disponibilidad cadena de alimentación 1.

Cadena de alimentación 1				
Id	Recurso	TR	TD	D
3	Ing. P1	26	63	0.41
5	Ing. P2	7	63	0.11
6	Ing. P3	7	63	0.11
7	Ing. P4	7	63	0.11
12	Ing. P3	3	63	0.05
13	Ing. P4	5	63	0.08
14	Ing. P5	5	63	0.08
15	Ing. P6	5	63	0.08
16	Ing. P1	3	63	0.05
83	Ing. S2	8	63	0.13
Disponibilidad máxima.				0.46
Factor de disponibilidad.				1.46

Tabla 9. Valores de disponibilidad cadena crítica.

Cadena Crítica				
Id	Recurso	TR	TD	D
3	Ing. P1	26	83	0.31
5	Ing. P2	7	83	0.08
6	Ing. P3	7	83	0.08
7	Ing. P4	7	83	0.08
13	Ing. P4	5	83	0.06
14	Ing. P5	5	83	0.06
15	Ing. P6	5	83	0.06
16	Ing. P1	3	83	0.04
84	Ing. S2	8	83	0.1
91	Ing. S9	2	83	0.02
95	Ing. S1	10	83	0.12
Disponibilidad máxima.				0.35
Factor de disponibilidad.				1.35

Se obtuvo un buffer de alimentación igual 2.1 días y un buffer de proyecto igual a 2.1 días.

$$\text{Buffer de alimentación 1} = F_{A11} * \sigma_{A11} = 1.46 * 1.45 = 2.1 \text{ días.}$$

$$\text{Buffer de proyecto} = F_{crit} * \sigma_{crit} = 1.35 * 1.57 = 2.1 \text{ días.}$$

### 3.3.2.4 Dimensionamiento de buffers método APD

El dimensionamiento del buffer por el método APD se llevó acabo partiendo de las actividades de la cadena crítica y de la cadena de alimentación 1.

El método APD depende de las incertidumbres asociadas a las tareas, al tratarse de las mismas actividades y las mismas cadenas utilizadas en el

método APRT fue posible usar los mismos valores. Adicionalmente en este método se calcula el factor de densidad de la red que toma en cuenta el número total de actividades, así como el número de relaciones de precedencia.

Tabla 10. Valores cálculo de buffer APD.

Cadena	$\sigma$	Np	NT	$\beta$	k
Cadena de alimentación 1	1.45	9	10	0.9	1.9
Cadena crítica	1.57	10	11	0.91	1.91

Se obtuvo un buffer de alimentación igual 2.8 días y un buffer de proyecto igual a 3 días.

$$\text{Buffer de alimentación 1} = k_{Al1} * \sigma_{Al1} = 1.9 * 1.45 = 2.8 \text{ días.}$$

$$\text{Buffer de proyecto} = k_{crit} * \sigma_{crit} = 1.91 * 1.57 = 3 \text{ días.}$$

### 3.4 Aplicación del método de simulación Montecarlo.

#### 3.4.1 Generalidades.

Para la simulación Montecarlo se hizo uso del software Oracle Crystal Ball® como "add in" del software MS Excel® en su versión profesional 2016.

Para la simulación Montecarlo tomando como base el método de la ruta crítica se usó el programa original del proyecto en el software MS Project® en su versión 2016.

Para la simulación Montecarlo tomando como base el método de la cadena crítica se tomó en cuenta la cadena crítica y la cadena de alimentación propuesta anteriormente y que se muestra en la figura 44. Se tomaron en cuenta 6 ingenieros para las actividades de bases de diseño y proceso, y 12 ingenieros para las actividades de sistemas.

Para cada uno de los métodos revisados se tomaron como base una cantidad de 10,000 simulaciones o escenarios posibles. Además de usarse



una distribución del tipo BetaPERT precargada en el software Oracle Crystal Ball® para representar el comportamiento de las tareas.

En la programación de las tareas se emularon los datos alimentados y obtenidos del software MS Project®.

### 3.4.2 Simulación Montecarlo.

#### 3.4.2.1 Simulación Montecarlo: método de la ruta crítica.

El método básico de la simulación Montecarlo parte de la construcción e identificación de la ruta crítica.

Para nuestro caso de estudio la ruta crítica original del proyecto tiene una duración de 56 días y consta de 19 actividades.

De la simulación realizada se obtuvo una media de duración del proyecto igual a 64.7 días y una probabilidad igual a 0 de que el proyecto dure 56 días.

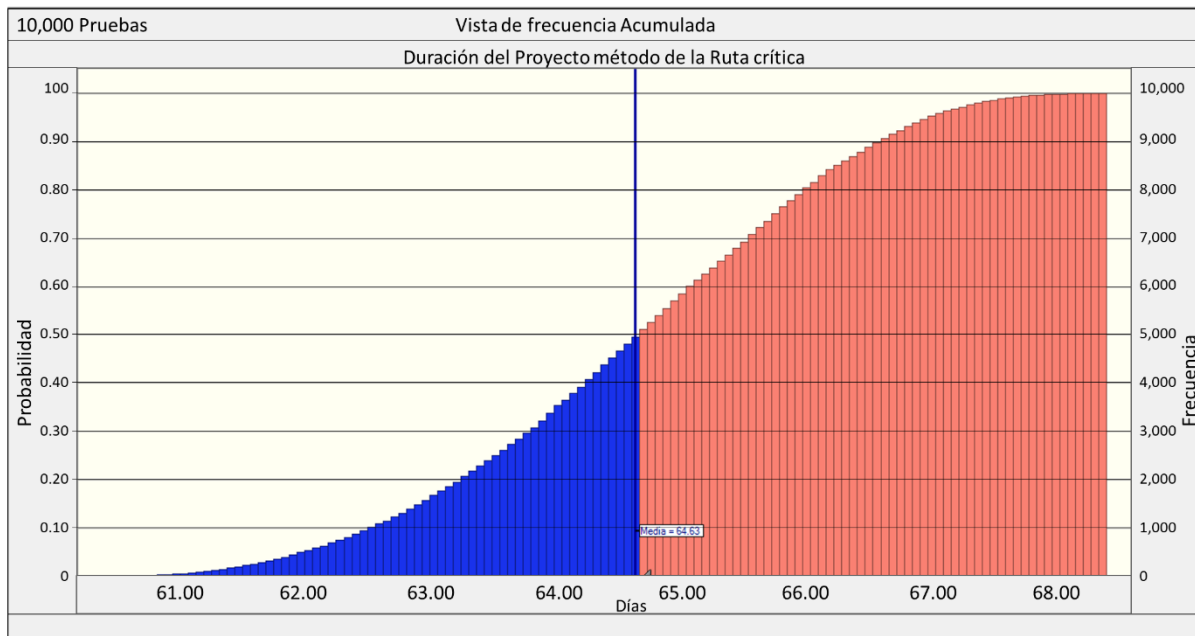


Figura 45. Duración del proyecto método de la ruta crítica.

### **3.4.2.2 Simulación Montecarlo: método de la cadena crítica.**

El método combinado de la simulación Montecarlo y la cadena crítica toma en cuenta la ruta crítica identificada del proyecto posterior a la asignación de los recursos los cuales, de igual forma que en la cadena crítica, son 6 ingenieros para el desarrollo de las actividades de bases de diseño e ingeniería de proceso y 12 ingenieros para el desarrollo de las actividades de sistemas.

La ruta crítica es la que se muestra en la figura 44, la cual consta de 11 actividades críticas y una cadena de alimentación, además de tener una duración base de 83 días.

De la simulación realizada se obtuvo una media de duración del proyecto igual a 93.4 días y una probabilidad igual a 0 de que el proyecto dure 83 días.

## 4 Resultados y Discusión.

### 4.1 Programa del proyecto ruta crítica.

A pesar de ser uno de los métodos básicos y más usados para el análisis y control de los proyectos el método de la ruta crítica por si solo presenta desventajas. Una de las más importantes es que esta no toma en cuenta las limitaciones de los recursos y su impacto en la duración del proyecto. La duración del proyecto según las consideraciones originales es de 56 días para el caso optimista, sin embargo, el análisis de riesgo realizado indica que la duración más probable del proyecto es de 64.9 días. Por otra parte, el análisis Montecarlo realizado muestra que existe una probabilidad del 56.71% de terminar el proyecto en 64.9 días.

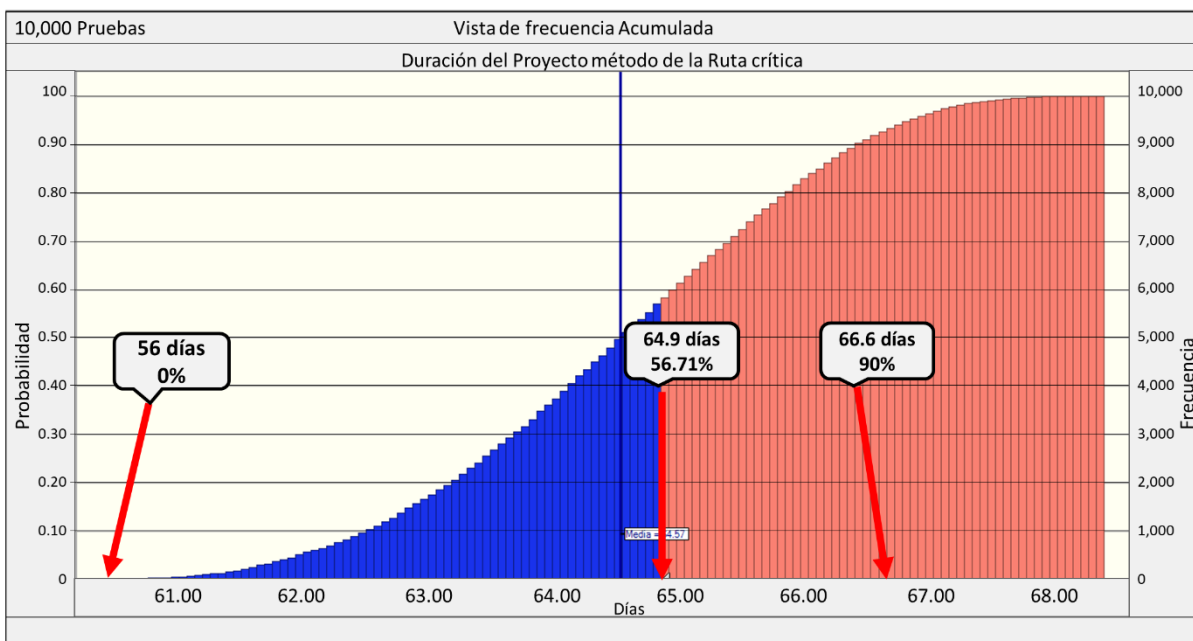


Figura 46. Simulación Montecarlo ruta crítica con duraciones.

La duración con una mayor probabilidad de ocurrencia según la simulación Montecarlo realizada es de 66.6 días lo que aventaja a la duración propuesta por el método de la cadena crítica cuya duración propuesta para el caso optimista era de 83 días.

La duración obtenida por el método de la ruta crítica sin duda alguna es mucho mejor comparada con la duración "proyectada" por el método de la cadena crítica lo que a primera vista resultaría mucho más atractivo para los gerentes del proyecto, sin embargo, como se mencionó anteriormente esta duración obtenida por ruta crítica no toma en cuenta uno de los factores más importantes, la restricción por la disponibilidad de los recursos y los riesgos propios de las actividades, factores determinantes en la mayoría de los proyectos.

#### **4.2 Programa del proyecto método de la cadena crítica.**

El método de la cadena crítica se fundamenta en tomar en cuenta la disponibilidad de los recursos, así como evitar las asignaciones multitareas, debido a estos ajustes la duración del proyecto se alarga en comparación con el método de la ruta crítica. Sin la asignación de buffers el proyecto toma una duración de 83 días como duración optimista.

El análisis Montecarlo realizado tomando en cuenta el análisis de riesgos realizado anteriormente muestra que el proyecto tiene una probabilidad igual a 0 de tener una duración igual a los 83 días proyectados en primera instancia y le asigna una probabilidad de 61.6% de lograr terminar el proyecto en 94 días lo que corresponde a la duración más probable que se estimó previamente. Con solo tener en cuenta el análisis de riesgos realizado, el método de la cadena crítica tiene una probabilidad mayor de terminar en la duración más probable estimada, sin embargo, aún falta tomar en cuenta la ubicación y dimensionamiento de los buffers planteados.

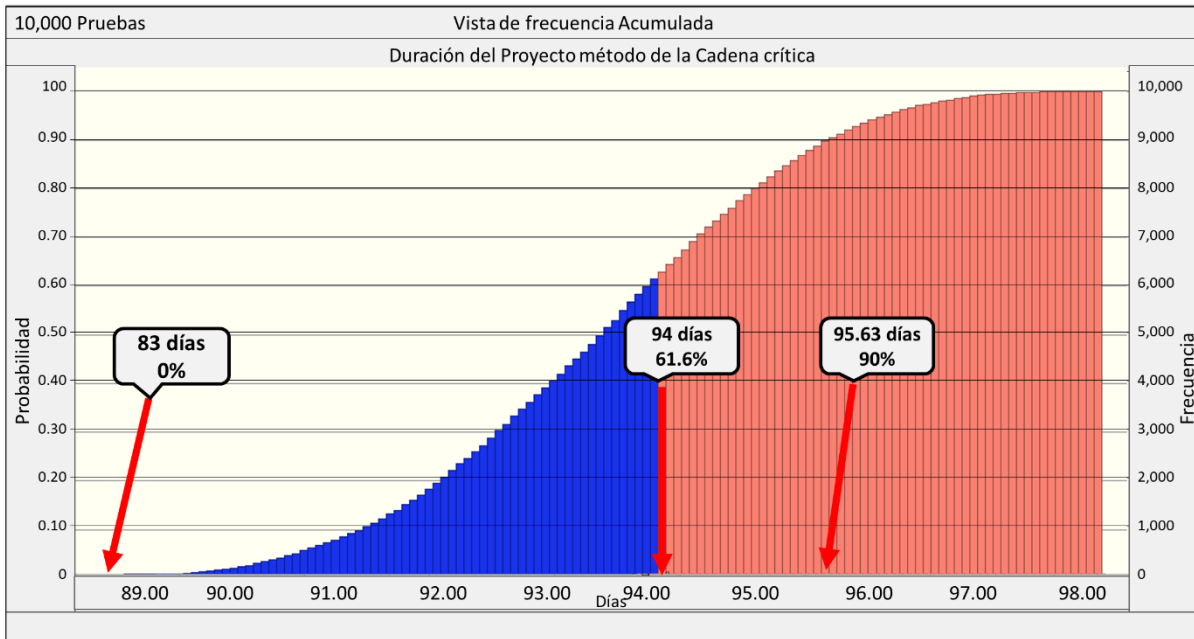


Figura 47. Simulación Montecarlo cadena crítica con duraciones.

#### 4.2.1 Programa del proyecto método de la cadena crítica: dimensionamiento "50%".

Los resultados obtenidos del dimensionamiento de los buffers mediante el uso del método 50% dan un buffer de alimentación 1 igual a 38 días, este buffer será ubicado posteriormente a la tarea con identificación 13 por lo que la tarea crítica con identificador 67 tendrá como predecesor al buffer de alimentación 1. Por su parte el buffer del proyecto tiene una duración de 42.5 días y será ubicado posterior a la última tarea crítica la cual corresponde a la tarea con identificador 67.

Tomando en cuenta la ubicación y dimensionamiento de los buffers la duración del proyecto se extiende hasta 153.5 días.

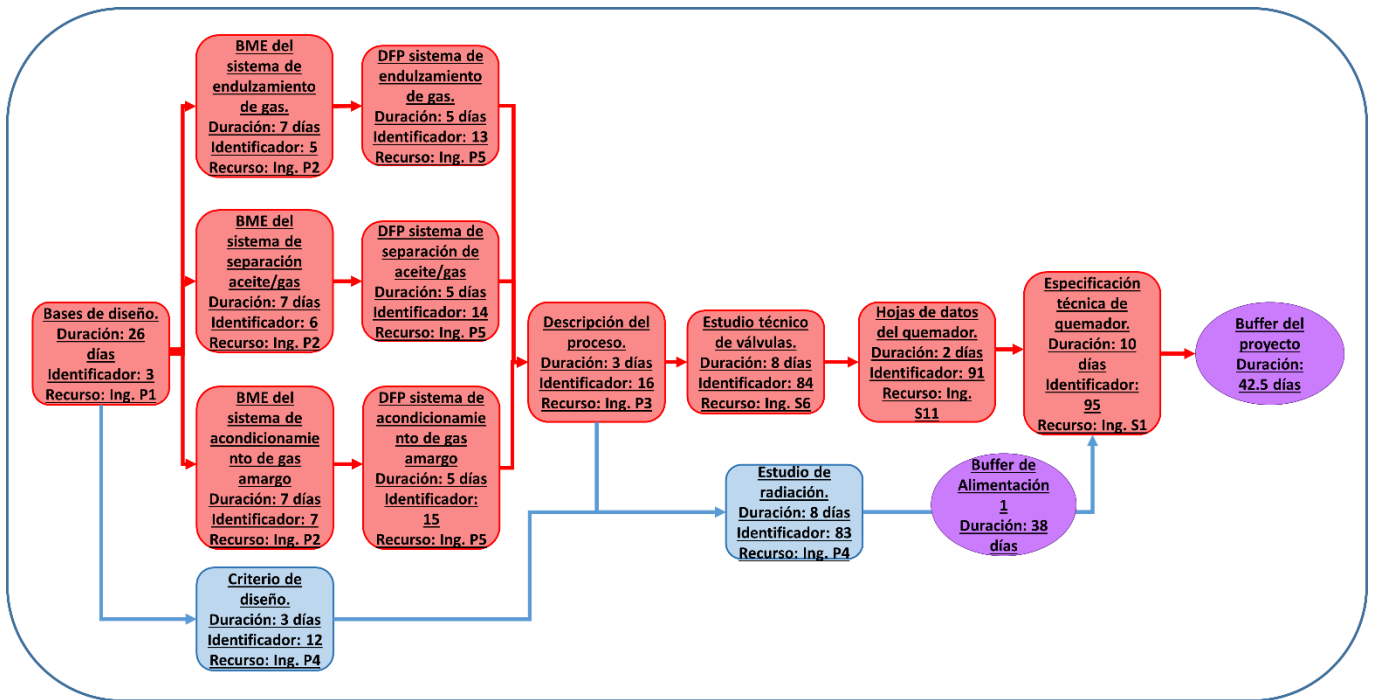


Figura 48. Cadena crítica con buffer método 50%.

Comparando los resultados obtenidos mediante el análisis de la simulación Montecarlo podemos observar que el proyecto tiene un 100% de probabilidad de terminar en los 153.5 propuestos por este método de dimensionamiento de buffers, sin embargo, la duración para el proyecto se encuentra muy por encima de lo requerido realmente para terminar el proyecto, esto lo podemos observar en la figura 47 donde para obtener una probabilidad prácticamente de 100% de terminación la duración del proyecto debe estar cercana a los 98 días.

Estos resultados nos muestran que el método "50%" da una duración sobrada para nuestro caso de estudio, que se encuentra muy por encima del caso pesimista cuya duración es 101.3 días. Esto puede deberse a la naturaleza del buffer ya que para el cálculo del mismo se toma en cuenta que durante la realización de las actividades ocurrirán tantas variaciones que igualan la mitad de la duración total de las tareas.

A pesar de ser un método sumamente sencillo podemos observar que los resultados no reflejan del todo la realidad y esto no puede ser compensado con un 100% de certeza de terminación del proyecto ya que esa duración excesiva puede retrasar de una forma importante las demás fases de la ingeniería causando inclusive la inviabilidad del proyecto.

#### **4.2.2 Programa del proyecto método de la cadena crítica: dimensionamiento "RSEM".**

El tamaño de los buffers obtenidos mediante el dimensionamiento del tipo RSEM tiene una duración igual a 4.4 días para el buffer de alimentación 1 y 4.7 días para el buffer del proyecto. Una vez colocados estos buffers dentro de la cadena crítica se obtuvo que el programa del proyecto tenía una duración de 87.7 días. Con respecto del método de dimensionamiento "50%" los buffers obtenidos no dotan de una duración excesiva al proyecto, sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que esta duración está dada por la suposición del caso optimista para las actividades. Haciendo uso de la simulación Montecarlo se obtuvo que la probabilidad de terminar el proyecto en los 87.7 días dados por el método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffers del tipo RSEM es menor al 1% con lo que podemos observar que el uso del método de la cadena crítica sin hacer uso de otra técnica de control de proyectos resultaría en una visión sesgada del ambiente total del proyecto.

Mediante el análisis de riesgos realizado en la sección 3.2.4.1 se obtuvo la duración más probable de las actividades que combinada con el dimensionamiento de buffers del tipo RSEM da como resultado la obtención de una nueva duración de los buffers y del proyecto completo. Los tamaños de los buffers para este escenario son de 1.8 para el buffer del proyecto y 1.9 para el buffer de alimentación por lo que la

duración total del proyecto es de 95.9 días con lo que se obtendría una certeza de terminación igual a 92.76%

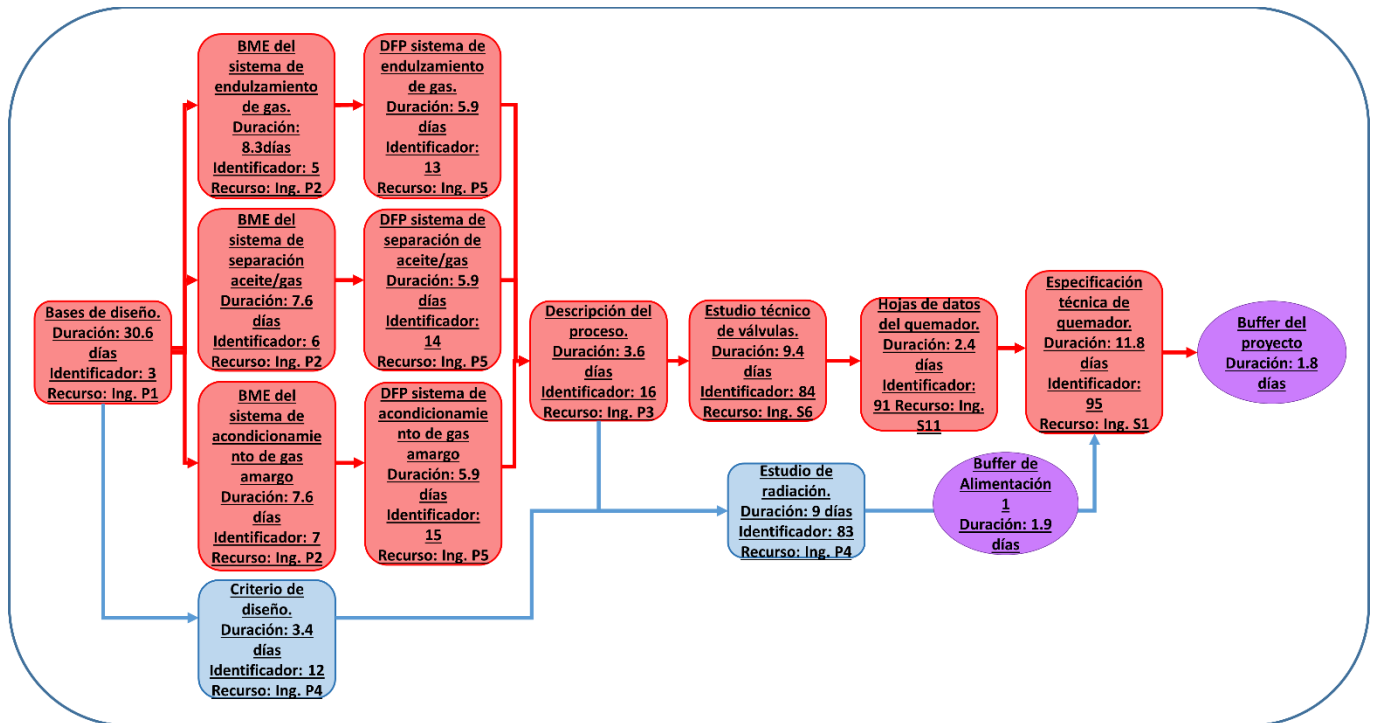


Figura 49. Cadena crítica con buffer método RSEM.

### 4.2.3 Programa del proyecto método de la cadena crítica: dimensionamiento "APRT".

Mediante el dimensionamiento de los buffers por el método APRT se obtuvo una duración del proyecto igual a 85.1 días con un buffer de alimentación 1 y de proyecto igual a 2.1 días cada uno. Estos resultados se obtienen tomándose en cuenta una duración optimista para las actividades.

Utilizando el análisis de riesgos realizado anteriormente podemos obtener una duración del proyecto igual a 94 días y el tamaño de los buffers de alimentación y del proyecto igual a 0.9 días por lo que el tamaño total del proyecto es igual a 94.9 días.





#### 4.2.4 Programa del proyecto método de la cadena crítica: dimensionamiento "APD".

Para el método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffers mediante la técnica APD se obtuvo un tamaño de buffer para la cadena de alimentación igual a 2.8 días y un buffer de proyecto igual a 3 días. Al aplicar los buffers calculados el tamaño del proyecto sería de 86 días tomándose en cuenta una duración optimista para las actividades.

Al utilizar el análisis de riesgos para establecer la duración más probable de las actividades de nuestro caso de estudio se obtiene un tamaño de buffer de alimentación 1 igual 1.1 días y un buffer de proyecto igual a 1.2 días, con esto la duración del proyecto sería de 95.2 días.

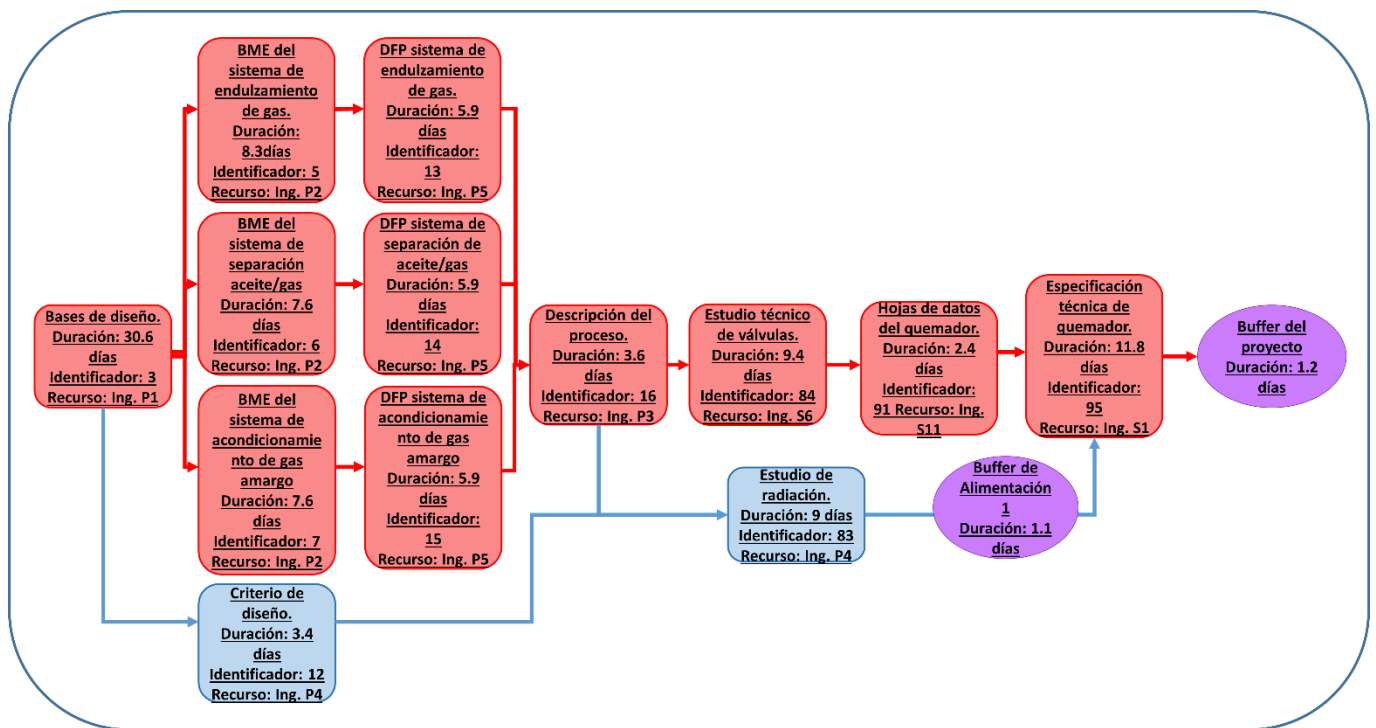


Figura 51. Cadena crítica con buffer método APD.

Finalmente, la simulación Montecarlo realizada para el método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffer tipo APD nos muestra

que la probabilidad de haber terminado el proyecto en un total de 95.2 días es igual a 84.12%.

El método APD presenta ciertas ventajas con respecto del método RSEM que hasta el momento es el que tiene una mayor probabilidad de terminación en la duración establecida. En primer lugar, el método APD toma en cuenta el número de relaciones de precedencia que poseen las actividades de las cadenas a analizar, así como las actividades que la componen por lo que en proyectos con una alta complejidad debido a las relaciones entre actividades representaría una gran ventaja con respecto de los otros métodos.

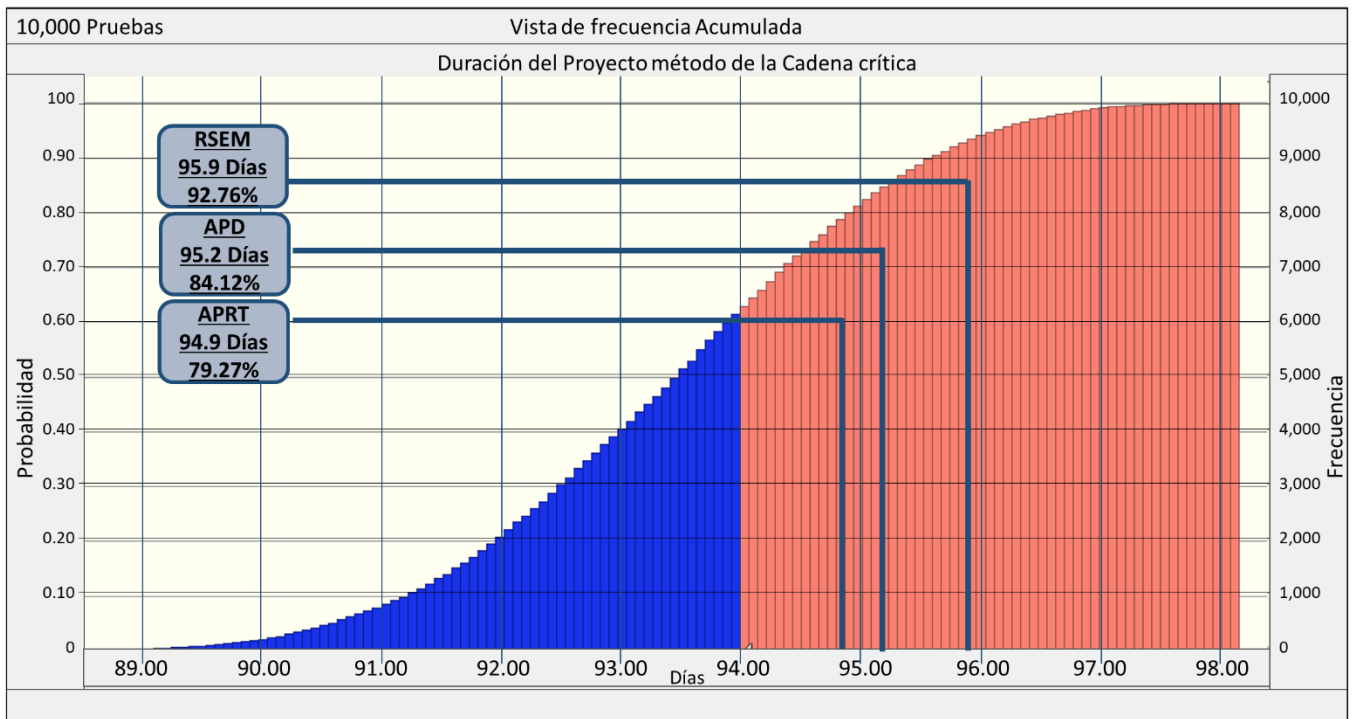


Figura 52. Duración del proyecto con distintos métodos y su probabilidad de ocurrencia.

## **5 Conclusiones y Recomendaciones.**

- A pesar de que el método de la ruta crítica tiene una duración menor a la de los otros métodos, la evaluación del proyecto reveló que la ruta crítica deja de lado cuestiones importantes como son las restricciones por la disponibilidad de los recursos, las asignaciones multitareas, complejidad de la red de tareas, etc.
- Los análisis realizados en el caso de estudio revelaron que el uso del método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffers del tipo "50%" prolonga la duración del proyecto de forma "excesiva" con respecto de los otros métodos de dimensionamiento de buffers.
- La aplicación del método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffers del tipo APD y RSEM resultaron ser los mejores de acuerdo a la evaluación del programa de la ingeniería básica para la construcción de una plataforma de producción tipo tetrápodo con una probabilidad de éxito de 84.12% en 95.2 días y 92.76% en 95.9 días respectivamente.
- El método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffer del tipo APD presenta una ventaja frente al método RSEM en proyectos con alta dependencia entre tareas debido a la naturaleza del buffer, la cual le permiten tomar en cuenta la complejidad de las redes de actividades.
- El método de la cadena crítica con un dimensionamiento de buffer del tipo APRT es recomendable para proyectos en los que no sea posible evitar una asignación multitareas de los recursos ya que este método posee la capacidad de tomar en cuenta las limitaciones de los recursos.
- La combinación del método de la cadena crítica y la simulación Montecarlo representa una amplia ventaja con respecto de los métodos individuales al otorgar un panorama más amplio de la situación del proyecto.

- La combinación del método de la cadena crítica y la simulación Montecarlo muestran mayores ventajas frente a la combinación del método de la ruta crítica y la simulación Montecarlo al incorporar numerosos factores en su análisis, lo que resulta en un mejor entendimiento del proyecto y sus necesidades.

## **6 Bibliografía.**

<sup>1</sup>Project Management Institute; A Guide to the Project Management Body of Knowledge, 5° Edición, Project Management Institute Inc., 2000.

<sup>2</sup>Adedeji B. B. y Tina K.; Statical Techiques for Project Control, 1° Edition, CRC Press, 2012.

<sup>3</sup>Project Management Institute; The High cost of low performance, Project Management Institute Inc., 2014.

<sup>4</sup>Project Management Institute; Succes in Disruptive Times, Project Management Institute Inc., 2018.

<sup>5</sup>Wellington Project Management; The State of Project Management: Annual Survey 2018, Wellington Limited, 2018.

<sup>6</sup>Avots, I.; Why does project management fail?, Management Reviews, vol. 59, 10 (36-41), 1970.

<sup>7</sup>Brooks, F. P.; The Mythical Man-Month: Anniversary Edition, Addison-Wesley, 1995.

<sup>8</sup>Black K.; Causes of Project Failure: A survey of professional engineers, PM Network, 21-24, 1996.

<sup>9</sup>Pinto, J. K. y Mantel S. J.; The causes of Project Failure, IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 37, 4 (269-275), 1990.

<sup>10</sup>Matta N. F. y Ashkenas R. N.; Why Good Projects Fail Anyway, Harvard Business Review, 109-114, 2003

<sup>11</sup>Neimat T.; Why IT projects fail, The Project Perfect White Paper Collection. <http://www.projectperfect.com.au>., 2005.

<sup>12</sup>Cooper J.; Improving focus and predictability with critical chain project management, PMI® Global Congress, 2013.

<sup>13</sup>Williams T.; Why Monte Carlo Simulations of Project Networks can Mislead, *Project Management Journal*, vol. 35, 53-61, 2004.

<sup>14</sup>Harold K.; *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*, 10° Edición, Jhon Wiley & Sons, 2009.

<sup>15</sup>Roger A.; Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria, *International Journal of Project Management*, vol. 17, 6 (337-342), 1999.

<sup>16</sup>Garold D. Oberlender; *Project Management for Engineering and Construction*, 2° Edición, McGraw-Hill, 2000.

<sup>17</sup>Serrador, P; The importance of the planning phase to project success, *PMI® Global Congress*, 2012.

<sup>18</sup>Rozenes, S., Vitner, G., & Spraggett, S.; Project control, *Project Management Journal*, Vol. 37, 4 (5-14), 2006.

<sup>19</sup>Adedeji B. y Tina K.; *Statical Techniques for Project Control*, 1° Edición, CRC Press, 2012.

<sup>20</sup>NewBold R. C.; *Project management in the fast lane: applying the theory of constraints*, St. Lucie Press, 1998.

<sup>21</sup>Peter S. y Guy L. R.; Project's Analysis through CPM (Critical Path Method), *School of Doctoral Studies Journal*, No. 1, 10-51, 2009.

<sup>22</sup>Murray B. W.; *When is the Critical Path Not the Most Critical Path?* , 1° Edición, ICS-Publications, 2011.

<sup>23</sup>Francisco A. R. y Alfonso D.; Critical Clouds and Critical Sets in resource-constrained projects, *International Journal of Project Management*, Vol. 22, 489-497, 2004.

<sup>24</sup>Kramer S. W. y Jenkins J. L.; Understanding the basics of CPM calculations: what is scheduling software really telling you? , PMI® Global Congress, 2006.

<sup>25</sup>William S. J.; Follow the Yellow Brick road (the critical path), PMI® Global Congress, 2011.

<sup>26</sup>Jeffrey E. y Justin R.; Bringing Discipline to Project Management, Harvard Business Review, Vol. 76, 153-159, 1998.

<sup>27</sup>Tzvi R., Robert B. y Dov D.; A Critical Look at Critical Chain Project Management, Project Management Journal, Vol. 4, 24-32, 2003.

<sup>28</sup>Lawrence P. L.; Critical Chain Project Management, 2º Edición, Artech House, 2004.

<sup>29</sup>Oya I. T., Walter O. R. y Sandra D. E.; An Investigation of buffer sizing techniques in critical chain Scheduling, EJOR, 176, 401-416, 2006.

<sup>30</sup>Bie L., Cui N. y Zhang X.; Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling, International Journal of Production Research, Vol. 50, 7343-7356, 2012.

<sup>31</sup>Vanhoucke M.; Integrated Project Management Sourcebook: A Technical Guide to Project Scheduling, Risk and Control, 1º Edition, Springer, 2016.

<sup>32</sup>Ma G., Li L. y Chen Z.; Business, Economics, Financial Sciences, and Management: Advances in Intelligent and Soft Computing "Research on the Buffer Sizing Approach in Critical Chain Scheduling in Perspective of Flexible Management", Springer, 2012.

<sup>33</sup>Kandaswamy S.; The basics of Monte Carlo simulation: a tutorial, Project Management Institute Inc, 2001.



<sup>34</sup>Schuyler J.; Risk and Decision Analysis in Projects, 2° Edition, PMI Inc, 2001.

<sup>35</sup>Intaver Institute; Monte Carlo Schedule Risk Analysis, Intaver Institute Inc., 2005.

<sup>36</sup>Vose D.; Risk Analysis: A quantitative guide, 3° Edition, John Wiley & Son Ltd., England, 2008.

<sup>37</sup>Visser J. K.; Suitability of Different Probability Distributions for Performing Schedule Risk Simulations in Project Management, PICMET, 2016.

<sup>38</sup>Scherer T. W., Pomroy A. T. y Fuller N. D.; The triangular density to approximate the normal density: decision rules-of-thumb, Reliability engineering & system safety, Vol. 82, 331-341, 2003.

<sup>39</sup>Trietsch D., Mazmanyán L., Gevorgyan L. y Baker R. K.; Modeling Activity Times by the Parkinson Distribution with a *Lognormal* core: Theory and Validation, European Journal of Operational Research, 2011.

<sup>40</sup>Hajdu M. y Bokor O.; The Effects of Different Distributions on Project Duration in PERT Networks, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 119, 766-775, 2014.

<sup>41</sup>Oracle®; Oracle® Crystal Ball User's Guide, Oracle®, 2018.

<sup>42</sup>Jurado D. E.; Administración de proyectos de diseño de una plataforma de compresión, UNAM, 2000.

<sup>43</sup>Moratinos E. J. L.; Plataformas Marinas, UNAM, 1989.

<sup>44</sup>Mendoza F. C.; Ingeniería costa fuera orientada al modelo electrónico tridimensional inteligente (METI), IPN, 2005.

<sup>45</sup>Chakrabarti K. S.; Handbook of offshore engineering, 1° Edition, Elsevier, Vol. 1, Oxford, 2005.

<sup>46</sup>Curiel Y. R., Franco N. J. M. & Albarrán N. J. F.; Gerencia de Proyectos de Ingeniería, Boletín IIE, enero-marzo, 2014.

<sup>47</sup>PEMEX; Manual del sistema institucional de desarrollo de proyectos, PEMEX, 2012.

<sup>48</sup>Rojas L. C.; La importancia y evolución de las herramientas empleadas para la planeación y control durante el desarrollo de proyectos de infraestructura, UNAM, 2013.

<sup>49</sup>Méndez R. J. & Hernández L. H.; Application of the dynamic Monte Carlo method in a maritime protection project, PMI® Global Congress, 2004.

<sup>50</sup>Lyons T. & Skitmore M.; Project Risk Management in Queensland Engineering Construction Industry. A survey; International Journal of Project Management, Vol. 22, 51-61, 2004.

<sup>51</sup>Murray L. S., Grantham K. & Damle B. S.; Development of a Generic Risk Matrix to Manage Project Risk, Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 5, 35-51, 2011.

<sup>52</sup>Miller R., Lessard D.; Understanding and managing risks in large engineering projects, International Journal of Project Management, Vol. 19, 437-443, 2001.

## 7 Apéndice.

### Matriz de riesgos.

EDT	Nombre de tarea	Impacto							Probabilidad						
		Riesgos Operacionales				Riesgos de Ingeniería			Riesgos Operacionales				Riesgos de Ingeniería		
		R.O.1	R.O.2	R.O.3	R.O.4	R.I.1	R.I.2	R.I.3	R.O.1	R.O.2	R.O.3	R.O.4	R.I.1	R.I.2	R.I.3
1	Ingeniería Básica														
1.1	Bases de Diseño														
1.1.1	Bases de Diseño	4	3	3	4	5	5	4	2	2	2	1	1	2	1
1.2	Proceso														
1.2.1	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.	3	2	3	3	4	5	5	1	2	2	1	1	1	1
1.2.2	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	1	1	1	1
1.2.3	Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	1	1	1	1
1.2.4	Balance de materia y energía e información complementaria de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	1	1	1	1
1.2.5	Balance de materia y energía e información complementaria de la planta potabilizadora de agua.	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	1	1	1	1
1.2.6	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de desfogue	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	1	1	1	1
1.2.7	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de interconexión.	2	2	2	2	3	3	3	1	2	2	1	1	1	1
1.2.8	Descripción del proceso.	3	4	3	4	4	5	4	1	2	2	1	1	2	1
1.2.9	Criterios de diseño.	3	3	3	4	2	3	3	1	1	2	2	1	1	1
1.2.10	Diagrama de flujo de proceso del sistema de endulzamiento de gas.	3	5	5	3	5	4	5	2	2	1	1	1	1	1
1.2.11	Diagrama de flujo de proceso del sistema de separación de aceite y gas.	3	5	4	3	4	3	4	2	2	1	1	1	1	1
1.2.12	Diagrama de flujo de proceso de acondicionamiento de gas amargo	2	4	4	3	4	3	4	2	2	1	1	1	1	1
1.2.13	Diagrama de flujo de proceso de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.	2	4	3	3	4	3	4	2	2	1	1	1	1	1
1.2.14	Diagrama de flujo de proceso de planta potabilizadora de agua.	2	4	3	3	4	3	4	2	2	1	1	1	1	1
1.2.15	Diagrama de flujo de proceso de sección de desfogue.	2	4	3	3	4	3	4	2	2	1	1	1	1	1
1.2.16	Diagrama de flujo de proceso del sistema de interconexión.	2	4	3	3	4	3	4	2	2	1	1	1	1	1
1.2.17	Especificación y cuestionario técnico del separador de primera etapa (Bifásico).	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.2.18	Especificación y cuestionario técnico del sistema de endulzamiento de gas.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.2.19	Especificación y cuestionario técnico del depurador de gas amargo.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.2.20	Especificación y cuestionario técnico de la planta de tratamiento de aguas amargas y aceitosas.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.2.21	Filosofías básicas de operación.	3	4	3	3	3	4	3	1	2	1	1	2	1	2
1.2.22	Hoja de datos del antiespumante.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.2.23	Hoja de datos de asfaltenos.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.2.24	Hoja de datos del inhibidor de corrosión.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.2.25	Hoja de datos del separador primera etapa.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.2.26	Hoja de datos del depurador de gas.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.2.27	Lista de equipo.	4	3	3	3	4	4	3	3	2	1	1	1	1	1
1.2.28	Requerimientos de servicios auxiliares y agentes químicos.	3	3	2	3	3	3	3	1	3	1	1	1	1	2

1.3	Ingeniería de Sistemas														
1.3.1	Análisis hidráulico de los ductos de transporte.	2	3	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2	2	1
1.3.2	Descripción lógica operacional.	3	3	2	3	3	2	3	2	2	1	1	2	1	2
1.3.3	Plano de notas generales, leyendas y símbolos.	2	2	2	2	2	3	3	2	3	1	1	2	1	2
1.3.4	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción cubierta inferior, elevación 19.100 metros.	3	4	3	3	3	3	3	1	3	1	2	2	1	1
1.3.5	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción, cubierta superior, elevación 27.939 metros.	3	4	3	3	3	3	3	1	3	1	2	2	1	1
1.3.6	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma de enlace.	3	4	3	3	3	3	3	1	3	1	2	2	1	1
1.3.7	Plano de localización general de equipo cubierta superior, elevación 26.518 metros. Plataforma de enlace.	3	4	3	3	3	3	3	1	3	1	2	2	1	1
1.3.8	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma habitacional	3	4	3	3	3	3	3	1	3	1	2	2	1	1
1.3.9	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 1.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.10	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 2.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.11	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de acondicionamiento de gas amargo. Plataforma de producción. PB-LIT-T.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.12	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de aceite. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.13	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de gas. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.14	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de regeneración. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.15	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de separación de aceite y gas. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.16	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.17	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel limpio. Plataforma de producción	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.18	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel sucio. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.19	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento e inyección de antiespumante e inhibidor de corrosión. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.20	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua de servicios. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.21	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua potable. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.22	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.23	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de inyección de asfaltos. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.24	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes de agua pluvial y drenajes atmosféricos. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.25	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes presurizados. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.26	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de desfogue y quemador. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.27	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas aceitosas. Plataforma de producción.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.28	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.29	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace (líneas por puente).	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.30	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua de servicio en plataforma habitacional.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2

1.3.31	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua potable en plataforma habitacional.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.32	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de diésel limpio en plataforma habitacional.	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.33	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas negras. Plataforma de producción	2	4	3	3	4	3	4	2	3	1	1	2	2	2
1.3.34	Especificación técnica y cuestionario técnico de quemador.	3	4	5	5	4	5	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.35	Especificación técnica y cuestionario técnico de arrestadores de flama.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.36	Especificación técnica y cuestionario técnico de boquillas de inyección de químicos.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.37	Especificación técnica y cuestionario técnico de filtros de servicio.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.38	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas aceitosas.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.39	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas negras.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.40	Especificación técnica y cuestionario técnico de válvulas de seguridad.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.41	Especificación del paquete depurador de gas.	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.42	Hojas de datos de los arrestadores de flama.	4	3	2	3	4	3	3	2	1	1	1	2	1	2
1.3.43	Hoja de datos de boquillas de inyección de químicos.	4	3	2	3	4	3	3	2	1	1	1	2	1	2
1.3.44	Hojas de datos del quemador.	4	4	5	4	4	4	5	2	1	1	1	2	1	2
1.3.45	Hojas de datos, bombas (diésel e inyección de químicos).	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.46	Hojas de datos, bombas (condensados de desfogue).	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.47	Hojas de datos, filtros de servicios.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.48	Hojas de datos, recipientes de servicios	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.49	Hojas de datos, válvulas de control de nivel, presión y flujo.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.50	Hojas de datos, válvulas de seguridad.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.51	Hojas de datos del tanque de desfogue.	4	3	2	3	4	3	4	2	1	1	1	2	1	2
1.3.52	Índice de servicios (clasificación de materiales de tubería por servicio).	3	3	3	3	2	3	3	2	2	1	1	2	2	2
1.3.53	Lista de líneas de proceso.	3	3	2	2	2	3	3	2	2	1	1	3	2	1
1.3.54	Lista de líneas de servicios auxiliares.	3	3	2	2	2	3	3	2	2	1	1	3	2	1
1.3.55	Estudio de análisis de capacidades de servicios auxiliares de la plataforma habitacional (agua potable, agua de servicio y diésel).	2	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2
1.3.56	Memoria de cálculo de líneas de proceso.	2	2	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.57	Memoria de cálculo de líneas de servicios.	2	2	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.58	Memoria de cálculo de válvulas de control y válvulas de seguridad.	2	2	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.59	Memoria de cálculo del sistema de desfogue.	2	2	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
1.3.60	Estudio de radiación.	2	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2
1.3.61	Estudio técnico de válvulas.	3	4	5	4	5	5	5	2	2	2	3	2	2	2
1.3.62	Sumario de equipo (lista de pesos).	3	3	2	2	2	3	3	2	2	1	1	3	2	1

		IR							Promedios		IR
EDT	Nombre de tarea	R.O.1	R.O.2	R.O.3	R.O.4	R.I.1	R.I.2	R.I.3	Impacto	Probabilidad	Promedios
<b>1 Ingeniería Básica</b>											
<b>1.1 Bases de Diseño</b>											
1.1.1	Bases de Diseño	A	M	M	M	A	A	M	4	2	M
<b>1.2 Proceso</b>											
1.2.1	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.	B	B	M	B	M	A	A	4	1	M
1.2.2	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.2.3	Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.2.4	Balance de materia y energía e información complementaria de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.2.5	Balance de materia y energía e información complementaria de la planta potabilizadora de agua.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.2.6	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de desfogue	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.2.7	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de interconexión.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.2.8	Descripción del proceso.	B	A	M	M	M	A	M	4	1	M
1.2.9	Criterios de diseño.	B	B	M	A	B	B	B	3	1	B
1.2.10	Diagrama de flujo de proceso del sistema de endulzamiento de gas.	M	A	A	B	A	M	A	4	1	M
1.2.11	Diagrama de flujo de proceso del sistema de separación de aceite y gas.	M	A	M	B	M	B	M	4	1	M
1.2.12	Diagrama de flujo de proceso de acondicionamiento de gas amargo	B	A	M	B	M	B	M	3	1	B
1.2.13	Diagrama de flujo de proceso de los servicios auxiliares, agua potable y de proceso, y agentes químicos.	B	A	B	B	M	B	M	3	1	B
1.2.14	Diagrama de flujo de proceso de planta potabilizadora de agua.	B	A	B	B	M	B	M	3	1	B
1.2.15	Diagrama de flujo de proceso de sección de desfogue.	B	A	B	B	M	B	M	3	1	B
1.2.16	Diagrama de flujo de proceso del sistema de interconexión.	B	A	B	B	M	B	M	3	1	B
1.2.17	Especificación y cuestionario técnico del separador de primera etapa (Bifásico).	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.2.18	Especificación y cuestionario técnico del sistema de endulzamiento de gas.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.2.19	Especificación y cuestionario técnico del depurador de gas amargo.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.2.20	Especificación y cuestionario técnico de la planta de tratamiento de aguas amargas y aceitosas.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.2.21	Filosofías básicas de operación.	B	A	B	B	M	M	M	3	1	B
1.2.22	Hoja de datos del antiespumante.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.2.23	Hoja de datos de asfaltenos.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.2.24	Hoja de datos del inhibidor de corrosión.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.2.25	Hoja de datos del separador primera etapa.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.2.26	Hoja de datos del depurador de gas.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.2.27	Lista de equipo.	A	M	B	B	M	M	B	3	1	B
1.2.28	Requerimientos de servicios auxiliares y agentes químicos.	B	A	B	B	B	B	M	3	1	B

1.3 Ingeniería de Sistemas											
1.3.1	Análisis hidráulico de los ductos de transporte.	B	B	B	M	M	M	B	3	2	M
1.3.2	Descripción lógica operacional.	M	M	B	B	M	B	M	3	2	M
1.3.3	Plano de notas generales, leyendas y símbolos.	B	M	B	B	B	B	M	2	2	B
1.3.4	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción cubierta inferior, elevación 19.100 metros.	B	A	B	M	M	B	B	3	2	M
1.3.5	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción, cubierta superior, elevación 27.939 metros.	B	A	B	M	M	B	B	3	2	M
1.3.6	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma de enlace.	B	A	B	M	M	B	B	3	2	M
1.3.7	Plano de localización general de equipo cubierta superior, elevación 26.518 metros. Plataforma de enlace.	B	A	B	M	M	B	B	3	2	M
1.3.8	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma habitacional	B	A	B	M	M	B	B	3	2	M
1.3.9	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 1.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.10	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de endulzamiento de gas. Plataforma de producción. Plano 2.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.11	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de acondicionamiento de gas amargo. Plataforma de producción. PB-LIT-T.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.12	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de aceite. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.13	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de medición de gas. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.14	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de regeneración. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.15	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Sistema de separación de aceite y gas. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.16	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.17	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel limpio. Plataforma de producción	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.18	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento y distribución de diésel sucio. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.19	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de almacenamiento e inyección de antiespumante e inhibidor de corrosión. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.20	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua de servicios. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.21	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de agua potable. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.22	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de distribución de aire de planta e instrumentos. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.23	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de inyección de asfaltos. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.24	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes de agua pluvial y drenajes atmosféricos. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.25	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de drenajes presurizados. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.26	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de desfogue y quemador. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.27	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas aceitosas. Plataforma de producción.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.28	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.29	Diagrama de tubería e instrumentación de proceso. Interconexión con plataforma de enlace (líneas por puente).	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.30	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua de servicio en plataforma habitacional.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M

1.3.31	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de agua potable en plataforma habitacional.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.32	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Interconexión con sistema de diésel limpio en plataforma habitacional.	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.33	Diagrama de tubería e instrumentación de servicios auxiliares. Sistema de tratamiento de aguas negras. Plataforma de producción	B	A	B	B	A	M	A	3	2	M
1.3.34	Especificación técnica y cuestionario técnico de quemador.	M	A	A	A	M	A	B	4	1	M
1.3.35	Especificación técnica y cuestionario técnico de arrestadores de flama.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.36	Especificación técnica y cuestionario técnico de boquillas de inyección de químicos.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.37	Especificación técnica y cuestionario técnico de filtros de servicio.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.38	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas aceitosas.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.39	Especificación técnica y cuestionario técnico de planta de tratamiento de aguas negras.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.40	Especificación técnica y cuestionario técnico de válvulas de seguridad.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.41	Especificación del paquete depurador de gas.	B	M	B	B	B	B	B	3	1	B
1.3.42	Hojas de datos de los arrestadores de flama.	A	B	B	B	A	B	M	3	1	B
1.3.43	Hoja de datos de boquillas de inyección de químicos.	A	B	B	B	A	B	M	3	1	B
1.3.44	Hojas de datos del quemador.	A	M	A	M	A	M	A	4	1	M
1.3.45	Hojas de datos, bombas (diésel e inyección de químicos).	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.46	Hojas de datos, bombas (condensados de desfogue).	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.47	Hojas de datos, filtros de servicios.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.48	Hojas de datos, recipientes de servicios	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.49	Hojas de datos, válvulas de control de nivel, presión y flujo.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.50	Hojas de datos, válvulas de seguridad.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.51	Hojas de datos del tanque de desfogue.	A	B	B	B	A	B	A	3	1	B
1.3.52	Índice de servicios (clasificación de materiales de tubería por servicio).	M	M	B	B	B	M	M	3	2	M
1.3.53	Lista de líneas de proceso.	M	M	B	B	M	M	B	3	2	M
1.3.54	Lista de líneas de servicios auxiliares.	M	M	B	B	M	M	B	3	2	M
1.3.55	Estudio de análisis de capacidades de servicios auxiliares de la plataforma habitacional (agua potable, agua de servicio y diésel).	B	M	B	M	M	M	M	3	2	M
1.3.56	Memoria de cálculo de líneas de proceso.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.3.57	Memoria de cálculo de líneas de servicios.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.3.58	Memoria de cálculo de válvulas de control y válvulas de seguridad.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.3.59	Memoria de cálculo del sistema de desfogue.	B	B	B	B	B	B	B	2	1	B
1.3.60	Estudio de radiación.	B	M	B	M	M	M	M	3	2	M
1.3.61	Estudio técnico de válvulas.	M	A	A	A	A	A	A	4	2	M
1.3.62	Sumario de equipo (lista de pesos).	M	M	B	B	M	M	B	3	2	M



## Cadena de alimentación y cadena crítica duración optimista

Cadena de alimentación 1			
Id	Nombre	Optimista	Pesimista
3	Bases de diseño.	26	33.8
5	BME del sistema de endulzamiento de gas	7	9.1
6	BME del sistema de separación de aceite y gas	7	8.1
7	BME acondicionamiento gas amargo	7	8.1
12	Criterios de diseño	3	3.6
13	DFP del sistema de endulzamiento de gas	5	6.5
14	DFP del sistema de separación de aceite y gas	5	6.5
15	DFP del sistema de acondicionamiento de gas amargo	5	6
16	Descripción del proceso	3	3.9
83	Estudio de radiación	8	9.2

Cadena Crítica			
Id	Nombre	Optimista	Pesimista
3	Bases de diseño.	26	33.8
5	BME del sistema de endulzamiento de gas	7	9.1
6	BME del sistema de separación de aceite y gas	7	8.1
7	BME acondicionamiento gas amargo	7	8.1
13	DFP del sistema de endulzamiento de gas	5	6.5
14	DFP del sistema de separación de aceite y gas	5	6.5
15	DFP del sistema de acondicionamiento de gas amargo	5	6
16	Descripción del proceso	3	3.9
84	Estudio técnico de válvulas	8	10.4
91	Hojas de datos del quemador	2	2.6
95	Especificación técnica del quemador	10	13

Cálculo de buffer método 50% "optimista".

Método 50%	
Buff Al 1	38
Buff proy	42.5

$$Buffer = \frac{Sum(D_i)}{2}$$

Cálculo de buffer método RSEM "optimista".

Método RSEM	
Buff Al 1	4.352585
Buff Proy	4.71964

$$Buffer = \sqrt{U_i + U_{i2} + \dots + U_n}$$

$$U_i = S_i - d_i$$

Cadena de alimentación 1			
Si	di	ld	Ui
33.8	29.9	3	3.9
9.1	8.05	5	1.05
8.1	7.55	6	0.55
8.1	7.55	7	0.55
3.6	3.3	12	0.3
6.5	5.75	13	0.75
6.5	5.75	14	0.75
6	5.5	15	0.5
3.9	3.45	16	0.45
9.2	8.6	83	0.6

Cadena crítica			
Si	di	ld	Ui
33.8	29.9	3	3.9
9.1	8.05	5	1.05
8.1	7.55	6	0.55
8.1	7.55	7	0.55
6.5	5.75	13	0.75
6.5	5.75	14	0.75
6	5.5	15	0.5
3.9	3.45	16	0.45
10.4	9.2	84	1.2
2.6	2.3	91	0.3
13	11.5	95	1.5

### Cálculo de buffer método APRT "optimista".

Método APRT	
Buff Al 1	2.118719
Buff Proy	2.12289

$$Buffer = F * \sigma_{camino} \quad \sigma_{camino} = \frac{b-a}{6} \quad F = 1 + disponibilidad\ máxima(D_{Max})$$

$$D_i = \frac{Trabajo\ requerido\ (TR)}{Trabajo\ Disponible\ (TD)} \quad TR = Duración\ de\ la\ actividad(DA_m) * Demanda\ de\ recursos(DR_n)$$

$$TD = Duración\ del\ camino\ más\ largo(DC) * Libertad\ de\ los\ recursos(DiL_n)$$

Cadena de alimentación 1			
Id	DA	DC	$\sigma$
3	26	63	1.3
5	7		0.35
6	7		0.183333
7	7		0.183333
12	3		0.1
13	5		0.25
14	5		0.25
15	5		0.166667
16	3		0.15
83	8		0.2

Cadena crítica			
Id	DA	DC	$\sigma$
3	26	83	1.3
5	7		0.35
6	7		0.183333
7	7		0.183333
13	5		0.25
14	5		0.25
15	5		0.166667
16	3		0.15
84	8		0.4
91	2		0.1
95	10		0.5

Recurso	Liberta d	DbuffAl 1			DbuffProy		
		TR	TD	D	TR	TD	D
Ing. P1	1	29	63	0.460317	29	83	0.349398
Ing. P2	1	7	63	0.111111	7	83	0.084337
Ing. P3	1	10	63	0.15873	7	83	0.084337
Ing. P4	1	12	63	0.190476	12	83	0.144578
Ing. P5	1	5	63	0.079365	5	83	0.060241
Ing. P6	1	5	63	0.079365	5	83	0.060241
Ing. S1	1	-	-	-	10	83	0.120482
Ing. S2	1	8	63	0.126984	8	83	0.096386
Ing. S3	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S4	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S5	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S6	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S7	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S8	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S9	1	-	-	-	2	83	0.024096
Ing. S10	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S11	1	-	-	-	-	-	-
Dis max				0.46031746			0.34939759
F				1.46031746			1.34939759
ocadena				1.450861813			1.573213272
Buff				2.118718838			2.122890199

### Cálculo de buffer método APD "optimista".

Método APD	
Buff Al 1	2.756637
Buff Proy	3.003407

$$Buffer = K * \sigma_{camino} \quad \sigma_{camino} = \frac{b-a}{6} \quad K = 1 + \beta_i$$

$$\beta_i = \frac{N_p}{N_T} \quad N_p = \text{Número total de relaciones de precedencia de la actividad } i$$

$$N_T = \text{Número total de actividades en la cadena.}$$

Cadena	$\sigma$	$N_p$	$N_T$	$\beta$	k
Cadena de alimentación 1	1.450862	9	10	0.9	1.9
Cadena crítica	1.573213	10	11	0.909091	1.909091

Cadena de alimentación y cadena crítica duración más probable

Cadena de alimentación 1			
Id	Nombre	Optimista	Pesimista
3	Bases de diseño.	30.6	33.8
5	BME del sistema de endulzamiento de gas	8.3	9.1
6	BME del sistema de separación de aceite y gas	7.6	8.1
7	BME acondicionamiento gas amargo	7.6	8.1
12	Criterios de diseño	3.4	3.6
13	DFP del sistema de endulzamiento de gas	5.9	6.5
14	DFP del sistema de separación de aceite y gas	5.9	6.5
15	DFP del sistema de acondicionamiento de gas amargo	5.7	6
16	Descripción del proceso	3.6	3.9
83	Estudio de radiación	9	9.2

Cadena Crítica			
Id	Nombre	Optimista	Pesimista
3	Bases de diseño.	30.6	33.8
5	BME del sistema de endulzamiento de gas	8.3	9.1
6	BME del sistema de separación de aceite y gas	7.6	8.1
7	BME acondicionamiento gas amargo	7.6	8.1
13	DFP del sistema de endulzamiento de gas	5.9	6.5
14	DFP del sistema de separación de aceite y gas	5.9	6.5
15	DFP del sistema de acondicionamiento de gas amargo	5.7	6
16	Descripción del proceso	3.6	3.9
84	Estudio técnico de válvulas	9.4	10.4
91	Hojas de datos del quemador	2.4	2.6
95	Especificación técnica del quemador	11.8	13

Cálculo de buffer método 50% "más probable".

Método 50%	
Buff Al 1	43.8
Buff proy	49.4

$$Buffer = \frac{Sum(D_i)}{2}$$

Cálculo de buffer método RSEM "más probable".

Método RSEM	
Buff Al 1	1.75784
Buff Proy	1.920937

$$Buffer = \sqrt{U_i + U_{i2} + \dots + U_n} \quad U_i = S_i - d_i$$

Cadena de alimentación 1			
Si	di	Id	Ui
33.8	32.2	3	1.6
9.1	8.7	5	0.4
8.1	7.85	6	0.25
8.1	7.85	7	0.25
3.6	3.5	12	0.1
6.5	6.2	13	0.3
6.5	6.2	14	0.3
6	5.85	15	0.15
3.9	3.75	16	0.15
9.2	9.1	83	0.1

Cadena crítica			
Si	di	Id	Ui
33.8	32.2	3	1.6
9.1	8.7	5	0.4
8.1	7.85	6	0.25
8.1	7.85	7	0.25
6.5	6.2	13	0.3
6.5	6.2	14	0.3
6	5.85	15	0.15
3.9	3.75	16	0.15
10.4	9.9	84	0.5
2.6	2.5	91	0.1
13	12.4	95	0.6

### Cálculo de buffer método APRT "más probable".

Método APRT	
Buff Al 1	0.866661
Buff Proy	0.873277

$$Buffer = F * \sigma_{camino} \quad \sigma_{camino} = \frac{b - a}{6} \quad F = 1 + disponibilidad\ máxima(D_{Max})$$

$$D_i = \frac{Trabajo\ requerido\ (TR)}{Trabajo\ Disponible\ (TD)} \quad TR = Duración\ de\ la\ actividad(DA_m) * Demanda\ de\ recursos(DR_n)$$

$$TD = Duración\ del\ camino\ más\ largo(DC) * Libertad\ de\ los\ recursos(DiL_n)$$

Cadena de alimentación 1			
Id	DA	DC	$\sigma$
3	30.6	71.4	0.533333
5	8.3		0.133333
6	7.6		0.083333
7	7.6		0.083333
12	3.4		0.033333
13	5.9		0.1
14	5.9		0.1
15	5.7		0.05
16	3.6		0.05
83	9		0.033333

Cadena crítica			
Id	DA	DC	$\sigma$
3	30.6	94	0.533333
5	8.3		0.133333
6	7.6		0.083333
7	7.6		0.083333
13	5.9		0.1
14	5.9		0.1
15	5.7		0.05
16	3.6		0.05
84	9.4		0.166667
91	2.4		0.033333
95	11.8		0.2

Recurso	Libertad	DbuffAl 1			DbuffProy		
		TR	TD	D	TR	TD	D
Ing. P1	1	34.2	71.4	0.478992	34.2	94	0.36383
Ing. P2	1	8.3	71.4	0.116246	8.3	94	0.088298
Ing. P3	1	11	71.4	0.154062	7.6	94	0.080851
Ing. P4	1	13.5	71.4	0.189076	13.5	94	0.143617
Ing. P5	1	5.9	71.4	0.082633	5.9	94	0.062766
Ing. P6	1	5.7	71.4	0.079832	5.7	94	0.060638
Ing. S1	1	-	-	-	11.8	94	0.125532
Ing. S2	1	9	71.4	0.12605	9.4	94	0.1
Ing. S3	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S4	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S5	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S6	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S7	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S8	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S9	1	-	-	-	2.4	94	0.025532
Ing. S10	1	-	-	-	-	-	-
Ing. S11	1	-	-	-	-	-	-
Dis max				0.478991597			0.363829787
F				1.478991597			1.363829787
ocadena				0.585946528			0.640312424
Buff				0.866609991			0.873277157

### Cálculo de buffer método APD "más probable".

Método APD	
Buff Al 1	1.113298
Buff Proy	1.222415

$$Buffer = K * \sigma_{camino} \quad \sigma_{camino} = \frac{b - a}{6} \quad K = 1 + \beta_i$$

$$\beta_i = \frac{N_p}{N_T} \quad N_p = \text{Número total de relaciones de precedencia de la actividad } i$$

$$N_T = \text{Número total de actividades en la cadena.}$$

Cadena	$\sigma$	$N_p$	$N_T$	$\beta$	k
Cadena de alimentación 1	0.585947	9	10	0.9	1.9
Cadena crítica	0.640312	10	11	0.909091	1.909091

Programación de la simulación Montecarlo método de la ruta crítica.

EDT	Nombre de tarea	Duración	Min.	Likely	Max.
<b>1 Ingeniería Básica</b>					
<b>1.1 Bases de Diseño</b>					
1.1.1	Bases de Diseño	26	26	30.6	33.8
<b>1.2 Proceso</b>					
1.2.1	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.	7	7	8.3	9.1
1.2.2	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.	7	7	7.6	8.1
1.2.3	Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.	7	7	7.6	8.1
1.2.9	Diagrama de flujo de proceso del sistema de endulzamiento de gas.	5	5	5.9	6.5
1.2.10	Diagrama de flujo de proceso del sistema de separación de aceite y gas.	5	5	5.9	6.5
1.2.11	Diagrama de flujo de proceso de acondicionamiento de gas amargo	5	5	5.7	6.0
1.2.12	Descripción del proceso.	3	3	3.6	3.9
1.2.27	Lista de equipo.	3	3	3.4	3.6
<b>1.3 Ingeniería de Sistemas</b>					
1.3.3	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción cubierta inferior, elevación 19.100 metros.	4	4	4.5	4.8
1.3.4	Plano de localización general del equipo, plataforma de producción, cubierta superior, elevación 27.939 metros.	4	4	4.5	4.8
1.3.5	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma de enlace.	4	4	4.5	4.8
1.3.6	Plano de localización general de equipo cubierta superior, elevación 26.518 metros. Plataforma de enlace.	4	4	4.5	4.8
1.3.7	Plano de localización general de equipo cubierta inferior, elevación 19.100 metros. Plataforma habitacional	4	4	4.5	4.8
1.3.8	Análisis hidráulico de los ductos de transporte.	10	10	11.3	11.5
1.3.43	Lista de líneas de proceso.	4	4	4.5	4.6
1.3.44	Índice de servicios (clasificación de materiales de tubería por servicio).	4	4	4.5	4.6
1.3.47	Memoria de cálculo de líneas de proceso.	4	4	4.3	4.6
1.3.48	Memoria de cálculo de líneas de servicios.	4	4	4.3	4.6

Duración del proyecto

56

## Programación de la simulación Montecarlo método de la Cadena Crítica.

EDT	Nombre de tarea	Duración	Min.	Likely	Max.
<b>1 Ingeniería Básica</b>					
<b>1.1 Bases de Diseño</b>					
1.1.1	Bases de Diseño	26	26	30.6	33.8
<b>1.2 Proceso</b>					
1.2.1	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de endulzamiento de gas.	7	7	8.3	9.1
1.2.2	Balance de materia y energía e información complementaria del sistema de separación de aceite y gas.	7	7	7.6	8.1
1.2.3	Balance de materia y energía e información complementaria de proceso de acondicionamiento de gas amargo.	7	7	7.6	8.1
1.2.9	Diagrama de flujo de proceso del sistema de endulzamiento de gas.	5	5	5.9	6.5
1.2.10	Diagrama de flujo de proceso del sistema de separación de aceite y gas.	5	5	5.9	6.5
1.2.11	Diagrama de flujo de proceso de acondicionamiento de gas amargo	5	5	5.7	6.0
1.2.12	Descripción del proceso.	3	3	3.6	3.9
<b>1.3 Ingeniería de Sistemas</b>					
1.3.51	Estudio técnico de válvulas.	8	8	9.4	10.4
1.3.58	Hojas de datos del quemador.	2	2	2.4	2.6
1.3.62	Especificación técnica y cuestionario técnico de quemador.	10	10	11.8	13

Duración del proyecto **83.00**