

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA PETROLERA**



**PROYECTO DE GRADO**

**MODELO METODOLÓGICO PARA LA  
REALIZACIÓN DE UN ANÁLISIS DE  
CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y  
MANTENIBILIDAD (RAM) EN LA ETAPA DE  
INGENIERÍA CONCEPTUAL**

Postulante: Pamela Clara Zambrana Foronda

Tutor: Ing. Fernando Cuevas Banda

La Paz – Bolivia

2022



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este proyecto a todos los futuros Ingenieros Petroleros de Bolivia, ya que en ellos recae la responsabilidad de innovar y aplicar nuevas técnicas permitan la optimización de los sistemas involucrados en la industria de gas y petróleo.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer principalmente a mi madre, hermano, a mi prima Gaby, a mi tía Elizabeth, a mi pareja y demás familia por su apoyo incondicional, que me motivó a continuar y finalizar mis estudios en la prestigiosa carrera de Ingeniería Petrolera de la Universidad Mayor de San Andrés.

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO .....	II
ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	XIV
RESUMEN EJECUTIVO.....	XV
RESUMEN TÉCNICO .....	XVII
CAPÍTULO 1. SÍNTESIS DEL PROYECTO.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	2
1.2.1. ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL.....	2
1.2.2. ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL.....	6
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.3.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	7
1.3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	9
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	10
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	10

1.4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
1.5.	JUSTIFICACIÓN .....	11
1.5.1.	JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	11
1.5.2.	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	11
1.5.3.	JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	11
1.5.4.	JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA .....	12
1.6.	ALCANCE.....	12
1.6.1.	ALCANCE TEMÁTICO .....	12
1.6.2.	ALCANCE ESPACIAL.....	12
CAPÍTULO 2.	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD.....	13
2.1.	APLICABILIDAD DEL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD EN EL CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO .....	14
2.1.1.	INGENIERÍA CONCEPTUAL.....	14
2.1.2.	ETAPA DE INGENIERÍA BÁSICA .....	14
2.1.3.	INGENIERÍA DE DETALLE.....	14
2.1.4.	EJECUCIÓN .....	15
2.1.5.	ETAPA OPERATIVA .....	15
2.1.6.	RENOVACIÓN .....	15
2.1.7.	DESMANTELAMIENTO.....	15

2.2.	IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS RAM.....	16
2.2.1.	SITUACIONES ANORMALES .....	16
2.2.2.	CONSECUENCIAS DE LAS SITUACIONES ANORMALES.....	17
2.2.3.	BENEFICIOS DE UN ANÁLISIS RAM EN LA INDUSTRIA DE GAS Y PETRÓLEO .....	17
2.3.	CONFIABILIDAD .....	18
2.3.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD ...	20
2.3.2.	DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE COMPONENTES (EQUIPOS) EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL.....	23
2.3.3.	DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL.....	34
2.4.	DISPONIBILIDAD .....	42
2.4.1.	DEFINICIONES DE DISPONIBILIDAD.....	43
2.4.2.	TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD.....	44
2.4.3.	DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE COMPONENTES (EQUIPOS) EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL .....	44
2.5.	MANTENIBILIDAD .....	46
2.5.1.	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO.....	47
2.5.2.	DETERMINACIÓN DE LA MANTENIBILIDAD DE COMPONENTES (EQUIPOS) EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL .....	48
2.6.	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA Y COSTOS DEL CICLO DE VIDA.....	50

2.6.1.	COSTOS DE ESPECIFICACIÓN .....	55
2.6.2.	COSTOS DE ESTABLECIMIENTO .....	55
2.6.3.	COSTOS DE UTILIZACIÓN .....	56
2.6.4.	COSTOS DE RECUPERACIÓN.....	56
2.6.5.	COSTO ACTUAL NETO Y COSTO ANUAL EQUIVALENTE.....	56
CAPÍTULO 3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO .....		58
3.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO .....	58
3.1.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AJUSTE DE PUNTO DE ROCÍO .....	60
3.1.2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO.....	61
3.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO.....	63
3.2.1.	TANQUE ACUMULADOR DE PROPANO .....	63
3.2.2.	VÁLVULA J-T .....	63
3.2.3.	CHILLER .....	65
3.2.4.	DEPURADOR DE SUCCIÓN.....	67
3.2.5.	COMPRESOR.....	68
3.2.6.	CONDENSADOR.....	70
3.2.7.	BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	72
3.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO .....	73
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO METODOLÓGICO .....		76

4.1.	INTRODUCCIÓN.....	76
4.2.	FASE 1: EL SISTEMA BAJO ESTUDIO.....	76
4.2.1.	ESTUDIO Y DISEÑO PREVIO DEL SISTEMA.....	76
4.2.2.	DELIMITACIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO .....	76
4.2.3.	DATOS ESPECÍFICOS PARA CADA EQUIPO.....	78
4.2.4.	MODELADO FUNCIONAL DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA.....	78
4.3.	FASE 2: OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS.....	79
4.3.1.	ASIGNACIÓN DE LOS MODOS DE FALLOS .....	79
4.3.2.	RECOPIACIÓN DE DATOS .....	80
4.3.3.	CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA.....	82
4.4.	FASE 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	83
4.4.1.	JERARQUIZACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	83
4.4.2.	PROPUESTA DE ALTERNATIVAS .....	84
4.4.3.	ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA .....	85
4.4.4.	COMPARACIÓN ENTRE ALTERNATIVAS.....	86
4.5.	ESQUEMATIZACIÓN DEL MÉTODO .....	86
4.5.1.	ESQUEMA GENERAL DEL MODELO METODOLÓGICO.....	86
4.5.2.	SECUENCIA GENERAL DE PASOS .....	87
4.5.3.	ESQUEMA DESARROLLADO DEL MODELO METODOLÓGICO.....	87

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN PRÁCTICA A UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON  
PROPANO 89

5.1.	FASE 1: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO .....	89
5.1.1.	ESTUDIO Y DISEÑO PREVIO DEL SISTEMA.....	89
5.1.2.	DELIMITACIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO .....	97
5.1.3.	DATOS ESPECÍFICOS PARA CADA EQUIPO.....	97
5.1.4.	MODELADO FUNCIONAL DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA.....	99
5.2.	FASE 2: OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS .....	100
5.2.1.	ASIGNACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO .....	100
5.2.2.	RECOPIACIÓN DE DATOS .....	102
5.2.3.	CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD .....	103
5.3.	FASE 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	116
5.3.1.	JERARQUIZACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	116
5.3.2.	PROPUESTA DE ALTERNATIVAS .....	119
5.3.3.	ANÁLISIS DEL COSTO DE CICLO DE VIDA.....	123
5.3.4.	COMPARACIÓN ENTRE ALTERNATIVAS.....	131
CAPÍTULO 6.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	134
6.1.	BENEFICIOS .....	134
6.2.	COSTOS .....	135

6.3. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO .....	136
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
7.1. CONCLUSIONES .....	138
7.2. RECOMENDACIONES .....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	141
ANEXOS.....	144

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Causas principales de situaciones anormales .....	16
Figura 2-2: Criterios de evaluación de la confiabilidad .....	19
Figura 2-3: Componentes de un sistema conectados en serie.....	36
Figura 2-4: Componentes de un sistema conectados en paralelo .....	37
Figura 2-5: Configuración de un sistema conectado en paralelo y en serie .....	38
Figura 2-6: Sistema en paralelo “m” de “n” .....	39
Figura 2-7: Modelo de cadena de Markov de dos estados para un componente reparable.....	41
Figura 2-8: Tiempos para el análisis de la disponibilidad.....	42
Figura 3-1: Diagrama Presión vs Entalpía para la refrigeración mecánica .....	62
Figura 3-2: Sistema de refrigeración con propano de una sola etapa .....	63
Figura 3-3: Válvula tipo globo.....	64
Figura 3-4: Partes del intercambiador de carcasa y tubos.....	65
Figura 3-5: Tipos de deflectores del chiller.....	66
Figura 3-6: Arreglos de pasos para los intercambiadores de calor .....	67
Figura 3-7: Depurador de succión .....	68
Figura 3-8: Compresor recíprocante.....	69
Figura 3-9: Compresor de tornillo .....	70
Figura 3-10: Tipos de aerofriadores.....	71
Figura 3-11: Partes de una bomba centrífuga.....	72
Figura 3-12: Diagrama Presión vs Entalpía detallado.....	73
Figura 4-1: Clasificación taxonómica con niveles taxonómicos .....	77
Figura 4-2: Obtención de datos genéricos del libro OREDA .....	81

Figura 4-3: Esquema general del modelo metodológico .....	86
Figura 4-4: Secuencia general de pasos del modelo metodológico .....	87
Figura 4-5 : Esquema desarrollado del modelo metodológico .....	88
Figura 5-1: Diagrama de bloques para el sistema de refrigeración con propano .....	100
Figura 5-2: Diagrama de bloques para el sistema con redundancias.....	120
Figura 5-3: Diagrama de bloques para la alternativa .....	121

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Índices de confiabilidad estadísticos.....	24
Tabla 2-2: Ecuaciones para diversas distribuciones de probabilidad .....	27
Tabla 2-3: Costos del ciclo de vida de un proyecto de ingeniería .....	52
Tabla 2-4: Costos durante las etapas del ciclo de vida de los activos .....	53
Tabla 3-1 : Condiciones de Gas de Venta .....	59
Tabla 4-1: Distribución probabilística de las tasas de falla de distintas fuentes de datos genéricos	83
Tabla 5-1: Datos para el diseño y simulación del sistema básico de refrigeración con propano .....	89
Tabla 5-2: Cálculo del peso molecular del gas natural de entrada .....	90
Tabla 5-3: Tabla de resultados del diseño del sistema básico refrigeración con propano .....	94
Tabla 5-4: Resultados de la simulación con Aspen Hysys .....	96
Tabla 5-5: Punto de rocío del Gas Natural .....	96
Tabla 5-6: Categorización general del sistema de refrigeración con propano .....	97
Tabla 5-7: Datos específicos de los equipos.....	98
Tabla 5-8: Relaciones funcionales entre equipos .....	99
Tabla 5-9: Análisis de Modos de Falla y Efectos.....	101
Tabla 5-10: Datos genéricos y datos adicionales .....	102
Tabla 5-11: Actualización de datos de falla .....	105
Tabla 5-12: Cálculo de la confiabilidad de los equipos .....	107
Tabla 5-13: Cálculo de la disponibilidad de los equipos .....	112
Tabla 5-14: Cálculo de la mantenibilidad de los equipos .....	115
Tabla 5-15: Resultados de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema básico de refrigeración con propano .....	116

Tabla 5-16: Cálculo de la criticidad de los equipos respecto a la confiabilidad .....	117
Tabla 5-17: Cálculo de la criticidad de los equipos respecto a la disponibilidad.....	118
Tabla 5-18: Resultado para el sistema alternativo.....	123
Tabla 5-19: Costos Capex para el sistema de refrigeración con propano .....	124
Tabla 5-20: Costos Opex.....	125
Tabla 5-21: Costo por pérdida de producción .....	126
Tabla 5-22: Costos directos por fallas .....	127
Tabla 5-23: Cálculo de los costos por baja confiabilidad .....	127
Tabla 5-24: Datos para el cálculo del costo anual equivalente para el sistema básico .....	129
Tabla 5-25: Cálculo del costo anual equivalente para el sistema básico .....	130
Tabla 5-26: Datos para el costo anual equivalente del sistema alternativo .....	130
Tabla 5-27: Cálculo del costo anual equivalente para el sistema alternativo.....	131
Tabla 5-28: Tabla de comparación entre sistemas .....	131
Tabla 6-1: Costos adicionales por implementar el proyecto.....	136

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 5-1: Ciclo de termodinámico P-H del sistema de refrigeración con propano diseñado .....	91
Gráfica 5-2: Probabilidad vs. Tiempo de operación (horas).....	108
Gráfica 5-3: Probabilidad vs. Tiempo de operación (días).....	109
Gráfica 5-4: Mantenibilidad vs. Tiempo de Reparación.....	115
Gráfica 5-5: Criticidad de los componentes respecto a la confiabilidad .....	118
Gráfica 5-6: Criticidad de los equipos respecto a la disponibilidad .....	119
Gráfica 5-7: Costo anual equivalente de las alternativas .....	132

## RESUMEN EJECUTIVO

La industria de gas y petróleo se caracteriza por incluir procesos de gran complejidad, por lo cual, sus instalaciones son costosas, más aún, hoy en día, que las normas vigentes sobre seguridad industrial y medioambiente, exigen a las empresas procesos optimizados con el menor impacto posible. A esto se suma el hecho de que estos sistemas deben operar con un alto rendimiento y un mínimo de interrupciones no planificadas para optimizar las ganancias y reducir los costos. Es por esta razón que el diseño de cualquier proyecto involucrado en esta industria debe estar respaldado por la mayor cantidad posible de información técnica, que permita a los inversores tomar las mejores decisiones y que garantice un funcionamiento adecuado de los sistemas, a lo largo de su vida útil.

El análisis de Confiabilidad, Disponibilidad, y Mantenibilidad (análisis RAM, por sus siglas en inglés) nace, para la industria aeroespacial en Estados Unidos, con el fin de minimizar los trabajos de mantenimiento en las estaciones espaciales. Con el tiempo, su aplicación se fue extendiendo a otras áreas de ingeniería, y hoy en día, ya existen casos de aplicación en la industria petrolera con resultados exitosos.

La importancia de este análisis, recae principalmente en la etapa de diseño de un proyecto, que es el punto focal de este trabajo (aunque también pueden aplicarse durante la etapa de operación, renovación y desmantelamiento), ya que permite seleccionar la mejor configuración de un sistema basándose no solamente en la eficiencia de este, sino también en el pronóstico de los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de todos los componentes (sean estos equipos o componentes de equipos). Es por eso que este análisis hace uso de datos estadísticos y ecuaciones matemáticas que representen la distribución de dichos datos, a través de la cuantificación de los indicadores, se logra jerarquizar a los componentes del sistema, para analizar si es conveniente

modificar su configuración (usando la redundancia de equipos, por ejemplo) y, además, crear un plan de mantenimiento previo.

Para la realización de un análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad en la etapa de ingeniería conceptual de un proyecto, es necesaria, primeramente, la obtención de datos estadísticos de tasas de fallas de equipos, para lo cual se cuenta con bases de datos genéricos (OREDA, WELL MASTER, PHMSA, etc), pero también es importante la colaboración de expertos de distintas áreas, por lo que la realización de este es de carácter multidisciplinario.

La literatura respecto al tema es extensa, es por eso que el objetivo de este proyecto es crear un modelo metodológico, sencillo pero soportado adecuadamente por información comprobable, que permita tanto su entendimiento e importancia como su aplicación, de manera que sea un aporte (punto de partida) para quienes deseen profundizar en el tema y aplicarlo en el futuro. El modelo metodológico del análisis RAM propuesto, finalmente, es aplicado a modo de ejemplo, en un sistema de refrigeración de propano, para una planta Dew Point en la etapa de diseño conceptual, utilizando la base de datos OREDA, y la opinión de expertos en el área.

## RESUMEN TÉCNICO

El primer capítulo consiste en la introducción al proyecto donde se establecen sus directrices, es decir, se realiza la identificación del problema, se puntualizan los objetivos, se establece el alcance y se justifica su elaboración.

El segundo capítulo es una descripción general del análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad y su importancia. Es ahí donde se describen los conceptos necesarios para entender a los principales indicadores del análisis RAM, que son la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de los componentes del sistema, así mismo se describen las técnicas y ecuaciones necesarias para su cuantificación.

El tercer capítulo describe brevemente el proceso de refrigeración con propano, y contiene información para su diseño.

El cuarto capítulo es el punto central del proyecto, donde se elabora el modelo metodológico que se propone. Este capítulo contiene todos los pasos, criterios y técnicas a utilizar para la realización del análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad y el resultado es una guía para su aplicación.

El quinto capítulo es la aplicación práctica, que se refiere a la ejemplificación del modelo metodológico propuesto para la realización del análisis RAM, la aplicación se hará en el sistema de refrigeración de propano de una planta Dew Point. En este capítulo se obtendrán los valores de los indicadores y se realizarán comparaciones entre dos configuraciones del sistema seleccionado para el análisis.

El sexto capítulo consta de un breve análisis económico del proyecto, donde se evalúa la relación beneficio/costo obtenido al aplicar el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad al sistema de refrigeración con propano.

Por último, el séptimo capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones finales y generales del proyecto, que se basarán tanto en el modelo metodológico propuesto, como en la aplicación práctica

# CAPÍTULO 1. SÍNTESIS DEL PROYECTO

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de grado hace referencia al planteamiento de un modelo metodológico para la realización de la evalua

ción de gestión de activos denominada “Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad”, mejor conocida como “Análisis RAM”, por sus siglas en inglés (Reliability, Availability, Maintainability), en la etapa de ingeniería conceptual de un proyecto; cuya aplicación estará enfocada en un sistema de refrigeración con propano para una planta Dew Point, en la etapa de diseño conceptual.

El análisis RAM, maneja tres conceptos que se relacionan entre sí para dar como resultado un estudio cuantitativo que permite determinar y visibilizar el efecto que cada equipo y/o componente tiene en la disponibilidad global del sistema. El primer concepto es el de “Confiabilidad”, que se puede entender como la probabilidad de que un sistema o componente funcione adecuadamente bajo condiciones determinadas y es función de las tasas de fallo individuales de los equipos. El segundo concepto es el de “Disponibilidad” que se entiende como la proporción del tiempo en la que el sistema o componente está disponible para operar correctamente; aunque este es el concepto más importante, es dependiente del primer y último concepto. Finalmente, se tiene el concepto de “Mantenibilidad”, el cual se define como la probabilidad de restituir o volver al servicio, en un tiempo determinado, a un sistema o componente que ha sufrido una falla o interrupción en su funcionamiento.

Por lo tanto, este estudio proporciona los medios por los cuales los diseños de ingeniería complejos, como los empleados en la industria del petróleo y gas, pueden ser analizados y revisados adecuadamente porque no sólo se centra en los componentes individuales del sistema, sino que toma en cuenta su combinación y la compleja integración de todos los equipos relacionados, por lo que puede considerarse un método que garantiza la integridad de ingeniería de cualquier proyecto.

Los resultados obtenidos de este análisis son principalmente el pronóstico de la Confiabilidad y disponibilidad del sistema seleccionado, la jerarquización de los sistemas o componentes críticos y el cálculo del costo de ciclo de vida del sistema. Finalmente se realiza una comparación tanto a nivel confiabilidad como a nivel económico del sistema básico diseñado y su alternativa planteada.

## ***1.2. ANTECEDENTES***

### ***1.2.1. ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL***

La tecnología moderna ha desarrollado una tendencia a diseñar y fabricar equipos y sistemas de mayor costo de capital, sofisticación, complejidad y capacidad; pero debido a problemas de diseño y soporte deficiente del producto, los equipos y sistemas del fabricante no son capaces de cumplir con estos requisitos. Las consecuencias desastrosas de la baja disponibilidad y el alto costo de mantenimiento llevaron a los ingenieros a buscar soluciones que permitan obtener una alta Confiabilidad, alta capacidad de mantenimiento y un mínimo tiempo medio de reparación de los sistemas. Una de estas soluciones es el empleo del análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) en la fase de diseño, fabricación e instalación, con el cual el número de fallos podría reducirse y minimizar sus consecuencias.

A partir de su aplicación en el sector militar y aeroespacial en los EE. UU., este estudio fue adaptándose a otros sectores industriales con éxito, especialmente en la industria petrolera y minera, de tal modo que hoy en día existen profesionales encargados de realizar este análisis de la manera más adecuada para cada caso.

Uno de los primeros estudios de evaluación de los parámetros relacionados con el análisis RAM, es el “El estudio de planificación y análisis de mantenimiento (MP&A) de la Estación Espacial de la NASA” presentado por E.T. DeJulio y J.H. Leet en el Simposio Anual de Confiabilidad y Mantenibilidad en 1988, cuyo propósito fue definir enfoques óptimos para la planificación de mantenimiento en órbita y el apoyo logístico. En éste, se hace hincapié en las actividades y procesos de mantenimiento que se pueden realizar en órbita dentro de las restricciones de diseño y soporte conocidas de la Estación Espacial. A partir de estos análisis, se establecen recomendaciones para los requisitos de mantenibilidad/mantenimiento. El objetivo final del estudio fue el de reducir los requisitos de mantenimiento en órbita a un mínimo práctico y seguro, conservando así el tiempo de la tripulación para los esfuerzos productivos.

Más tarde se presentaron las primeras guías de aplicación del análisis RAM en proyectos de ingeniería en general, una de las primeras fue el artículo “Directrices para integrar consideraciones de RAM en un proyecto de ingeniería” de los autores V.H. Guthrie; J.A. Farquharson; R.W. Bonnett; E.F. Bjoro, publicado en la revista IEEE Transactions Reliability en 1990. En este artículo se presentan las pautas del programa de Confiabilidad, disponibilidad y mantenimiento (RAM) desarrolladas por el grupo de trabajo del Departamento de Energía RAM de EE. UU.

Otro ejemplo aún más específico es el trabajo denominado “Desarrollando una base de datos para un programa de mejora de Confiabilidad, disponibilidad y mantenimiento para una planta industrial o edificio comercial” de R.H. McFadden de 1990; este documento describe un proceso probado en el tiempo para ensamblar una base de datos de RAM sólida cuyo objetivo es obtener datos numéricos fiables que expresen de forma cuantitativa la probabilidad de que los componentes, partiendo de la idea de que el desarrollo de bases de datos es una parte crítica del diseño de cualquier programa de RAM industrial. Su aplicación principal se enfoca a sistemas eléctricos, pero los autores aseguran que se puede utilizar con éxito en la mejora de la Confiabilidad de otros tipos de sistemas en una instalación industrial, edificio comercial o centro de salud.

Pero no sólo existieron avances teóricos en lo referido al análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, sino que, con su desarrollo, se crearon paquetes informáticos con el fin de calcular las variables involucradas en el análisis. Algunos de estos son descritos en el artículo denominado “Revisión de herramientas informáticas para el análisis de la Confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) de equipos industriales” de L. Barberá, V. González, A. Crespo y P. Moreu, publicado en la Revista de Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Vol. 68 del año 2010. El objetivo de este artículo es hacer una revisión de distintas herramientas software que dan soporte al análisis de la Confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) de equipos industriales, donde se describen y enumeran las principales características modulares de hasta tres herramientas representativas del mercado. Así mismo se pretende dar a conocer las distintas estructuras operativas en las que se presentan este tipo de software y sus características y, por otro, facilitar la comparación entre todas ellas

mediante un análisis tabular descriptivo de los módulos comunes y no comunes. Posteriormente, se proponen un conjunto de factores de caracterización que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar detalladamente una herramienta RAMS, ya que pueden determinar en gran medida sus funcionalidades y su adecuación a las necesidades específicas en cada caso.

Por otro lado, en los últimos años, varios profesionales han resaltado la importancia de la aplicación del análisis RAM en la industria de Petróleo y Gas, dando a conocer sus objetivos, alcances y ventajas. Esto se ve reflejado en el artículo denominado “Estudio RAM sobre el sistema de producción submarina de una plataforma de petróleo y gas en alta mar” realizado por Donghun Lee, Kiil Nam, Junhong Kim, Kwangpil y Chang Sejoong Lee publicado en 2004, es otro ejemplo de la aplicación del análisis RAM en la industria petrolera. Los principales objetivos del estudio son cuantificar el desempeño del sistema submarino de una plataforma de producción de gas costa afuera en términos de varios parámetros: Eficiencia de producción, Criticidad de equipos y sistemas, Recomendaciones para lograr la disponibilidad específica del sistema. El análisis se realiza a través del estudio RAM. Se realiza un análisis cualitativo para reconocer cada modo de falla y la consecuencia de eventos relacionados con la identificación de las instalaciones críticas para la eficiencia de producción del sistema submarino. El método Reliability Block Diagram (RBD) se utiliza para el análisis cuantitativo de la Confiabilidad del sistema. Sobre la base de los resultados de RBD, la disponibilidad y la capacidad de mantenimiento se evalúan mediante varias estrategias de operación y mantenimiento. Los datos de fallas se han tomado de referencias genéricas como los Manuales OREDA, NPRD y EPRD.

El trabajo denominado “La gestión de inversiones y el ciclo de vida de los activos”, escrito por Víctor Borges, y publicado en la revista Petrotecnia en 2015 también refleja la creciente importancia de la aplicación de análisis RAM a la industria petrolera. Este trabajo plantea el uso del análisis RAM, al administrar los gastos de una planta de procesos, ya que permite tomar decisiones informadas y reducir la incertidumbre respecto del comportamiento de la producción, la cual ayuda a predecir con mayor exactitud. Como ejemplo, presenta un caso práctico de aplicación del estudio a una plataforma offshore.

Los anteriores, son algunos de los números ejemplos referidos al análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad a nivel internacional, los cuales sirven como referente no sólo para el presente proyecto sino para futuros trabajos.

### ***1.2.2. ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL***

Se vio que es menester mencionar previamente, que la aplicación del método RAM no es muy común todavía en el contexto boliviano, sin embargo, existe un trabajo realizado por la empresa extranjera denominada Gie Group, con base en el departamento de Santa Cruz. En la publicación denominada “Implementación de Análisis RAM en un sistema de transporte por ductos en Bolivia”, realizada por dicha empresa en 2005, se detalla lo siguiente. Con la aplicación del análisis RAM, el objetivo fue la de gestionar el riesgo de multas en contratos con despacho en firme asegurando una disponibilidad efectiva mínima del 95% de un sistema de transporte de Gas de 30” con una extensión de 500km de longitud, 4 Estaciones de Compresión a lo largo de la traza, 3 estaciones de medición y 2 puntos de entrega, perteneciente a la empresa Gas Trans Boliviano.

Por otro lado, la Empresa GIE GROUP logró determinar que los turbocompresores de estaciones de compresión 1 y 2 contribuyen en un 57,6% en la indisponibilidad del

sistema, representando una pérdida absoluta del 2,64%, que resultaron siendo los equipos que mayor incidencia tienen sobre la indisponibilidad del sistema. Sobre la base de la información obtenida se plantearon 8 escenarios de cursos de acción principal y 4 escenarios de cursos de acción combinados (casos), cuya ejecución permiten obtener un incremento de disponibilidad media entre 1 y 3%.

Esta información es corroborada en su memoria anual de 2005 “La disponibilidad y Confiabilidad obtenidas este año han permitido cumplir en un 100% con las programaciones de transporte. Es importante notar que los requerimientos de transporte se acercan cada vez más a la máxima capacidad del sistema. Cada año el promedio día se acerca al valor contractual máximo...Este requerimiento se vuelve desafiante tomando en cuenta que el Contrato de Transporte Bolivia no contemplan ninguna provisión para paros por mantenimiento. Es decir que cualquier falla o paro programado podría generar penalidades para la empresa. Como respuesta a este desafío, GTB ha generado una iniciativa única a un reto único: El Plan de Alta Disponibilidad. Este Plan junto al Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenimiento (RAM por sus siglas en inglés Reliability, Availability) llevado a cabo, son las bases para asegurar que GTB cumpla con sus compromisos de transporte en el futuro inmediato y por la duración de sus contratos.” (GTB, 2005, págs. 25,26)

### ***1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA***

#### ***1.3.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA***

Actualmente, debido al decaimiento de las reservas globales de hidrocarburos, a la volatilidad de los precios y al incremento en complejidad de los sistemas involucrados en la industria del gas y petróleo, los empresarios exigen más información para invertir

o seguir invirtiendo en un proyecto de ingeniería, indistintamente si este pertenece al Upstream, Midstream o Downstream de la industria. Esta información debe servir como soporte para la toma de decisiones referentes a la configuración de los sistemas involucrados, de modo que estos sean eficientes y cumplan con la reglamentación establecida en cada país, pero a la vez tengan un costo de operación que no sobrepase los ingresos y genere utilidades.

Los sistemas en la industria hidrocarburífera son en general sistemas complejos, donde uno o varios de los siguientes factores pueden tener un gran impacto en el funcionamiento del conjunto:

- Diseño o especificaciones insuficientes para satisfacer los problemas inherentes al sistema.
- Sobredimensionamiento de un proyecto.
- Selección inadecuada de equipos.
- Falta de infraestructura adecuada.
- Falta de estrategias y planeamientos de mantenimiento de los equipos e instalaciones.
- La prueba inadecuada u excesivamente optimista del funcionamiento del sistema antes de su puesta en marcha.
- Falta de identificación adecuada de repuestos y equipos de instalaciones como válvulas manuales y tuberías tanto en planos de diseño como en el lugar.

Todo esto es el resultado de la falta de una evaluación adecuada de la integridad de ingeniería de un proyecto o sistema durante su diseño, y, por ende, deviene en

consecuencias operativas, económicas, sociales y medioambientales que pueden ser de gran consideración, alguna de éstas son:

- Paros no programados por fallas de los equipos o instalaciones.
- La necesidad de rectificar los procesos y controles.
- Retraso en el tiempo de producción o en el tiempo en que se debe alcanzar un objetivo.
- Pérdida de producción.
- Operación con un bajo índice de rendimiento y capacidad respecto a lo esperado.
- Financiación adicional para cubrir los costos extras causados por los problemas originados.

Es así que, para mejorar la integridad de ingeniería de un proyecto y evitar los problemas ya mencionados, es recomendable realizar un análisis que evalúe los criterios de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de un sistema durante su ciclo de vida, pero prioritariamente durante las etapas de diseño.

### ***1.3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA***

Muchas veces el diseño de un sistema de ingeniería no toma en cuenta la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los equipos que lo conforman, por lo que en el futuro surgen problemas relacionados con fallas que devienen en paros imprevistos, pérdidas de producción y de recursos económicos durante la fase de operación, entre otras consecuencias. Debido a que los sistemas involucrados en la industria petrolera requieren una gran inversión de dinero y una eficiencia alta, las decisiones tomadas durante su configuración deben estar respaldadas por información que pronostique su

funcionamiento a futuro y permita una planificación inicial de mantenimiento con el fin de minimizar las afecciones causadas en el conjunto.

#### ***1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN***

##### ***1.4.1. OBJETIVO GENERAL***

- Diseñar un modelo metodológico que permita la realización de un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (análisis RAM) en la etapa de ingeniería conceptual para proyectos de la industria de gas y petróleo.

##### ***1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS***

- Estudiar las técnicas y métodos involucrados en el análisis RAM para poder conocer sus alcances, limitaciones y la importancia de su aplicación en la industria petrolera.
- Estructurar un procedimiento sencillo y entendible, que permita entender y realizar el análisis RAM en la etapa de ingeniería conceptual.
- Ejemplificar la aplicación de dicho análisis en un sistema de refrigeración de propano de una planta Dew Point con ayuda de datos genéricos obtenidos de la base de datos OREDA, en la etapa de diseño conceptual.
- Utilizar medios tecnológicos de fácil disponibilidad, como el uso de Excel para crear una plantilla que sirva como punto de partida para la realización del análisis en cualquier otro sistema.

## ***1.5. JUSTIFICACIÓN***

### ***1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA***

El análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (análisis RAM), es una metodología relativamente nueva, en el contexto boliviano, que junto con otras (como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad y la Inspecciones basadas en Riesgo), están ganando importancia por los antecedentes exitosos existentes en la industria. Es por esta razón que el valor de realizar su estudio radica en conocer y familiarizarse con los diferentes términos y conceptos involucrados que posteriormente pueden llegar a ser útiles para quien decida obtener una especialización relacionada con el tema.

### ***1.5.2. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA***

El análisis RAM es una herramienta de pronóstico de eficacia de un sistema o equipo a través de la cuantificación de dichos indicadores, y se lo realiza con un equipo multidisciplinario cuyas experiencias y valoraciones son importantes para la aplicación de la metodología, y se basa también, en la estadística de datos reales o genéricos y distintas técnicas de análisis de fallas, que al integrarse logran un estudio ventajoso para la empresa que desee aplicarla. La industria petrolera puede hacer uso de ella en diferentes etapas de su ciclo de vida, siendo la etapa de diseño la más adecuada, ya que permite analizar la configuración de los sistemas involucrados y optimizarlos económica y operacionalmente.

### ***1.5.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA***

Hoy en día, las empresas del sector hidrocarburífero buscan respaldar la toma de decisiones en estudios predictivos que optimicen la inversión de sus recursos económicos a corto y largo plazo. Es por eso, que el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad llega a ser una base bien fundamentada sobre la cual diseñar la

configuración de un sistema, que funcione adecuadamente durante su ciclo de vida, y minimice los paros no programados cuyas consecuencias son la erogación de presupuesto extra y pérdida de producción y tiempo.

#### ***1.5.4. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA***

El análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad es un conjunto de varias técnicas y métodos de análisis de la gestión de activos, que deben elegirse de acuerdo al tipo de sistema que se va a estudiar, es por esta razón, que un modelo metodológico básico para su aplicación es importante, ya que sirve como una guía fácil de entender y/o reproducir por el cual comenzar.

#### ***1.6. ALCANCE***

##### ***1.6.1. ALCANCE TEMÁTICO***

El presente proyecto se enfocará en estudiar y establecer los pasos a seguir para la realización de un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, así como ejemplificar su aplicación mediante la cuantificación de dichos indicadores, en base a datos genéricos del libro OREDA, opinión de expertos y criterios propios.

Para tal efecto, se emplearán conocimientos adquiridos sobre procesos y tecnología del gas natural, computación para ingeniería, instrumentación, probabilidad y estadística.

##### ***1.6.2. ALCANCE ESPACIAL***

Este proyecto tiene como ejemplo de aplicación el análisis del sistema de Refrigeración de Propano de una planta Dew Point en su etapa de diseño conceptual.

## **CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD**

El análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, también llamado análisis RAM por sus siglas en inglés (Reliability, Availability, Maintainability), es una metodología de estudio de sistemas productivos y los equipos relacionados a estos, que se basa tanto en la configuración y confiabilidad de los componentes como en la filosofía de mantenimiento y operación.

La realización de este estudio resulta en el pronóstico de la disponibilidad y del factor de servicio del sistema, para ello hace uso de datos como las tasas de falla de los componentes, tiempo medio entre fallas, tiempo medio de reparación, estos datos sirven para modelar el comportamiento del sistema desde el punto de vista de la confiabilidad. De este modo, el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, permite optimizar el rendimiento del sistema bajo estudio, minimizar la pérdida de producción debido al fallos, planear opciones de redimensionamiento y de mantenimiento, jerarquizar los equipos críticos que afectan a la disponibilidad del sistema y develar debilidades en el mantenimiento, logística y fallas recurrentes de equipos, pudiéndose así, plantear y evaluar soluciones cuya relación costo – beneficio permita mejorar la rentabilidad de la producción del sistema estudiado.

Por lo tanto, la importancia de este método radica en el hecho de que provee de medios para analizar, revisar sistemas de ingeniería complejos y garantizar que estos cumplan con los requisitos apropiados y previstos en las condiciones de operación establecidas.

## ***2.1. APLICABILIDAD DEL ANÁLISIS DE CONCONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD EN EL CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO***

### ***2.1.1. INGENIERÍA CONCEPTUAL***

Etapa preliminar donde se realiza la descripción del sistema propuesto en términos de una serie de ideas y conceptos integrados, los mismos que serán respaldados evaluar la factibilidad de cada alternativa. En esta etapa, el análisis RAM permite una revisión rápida de diversas opciones de desarrollo para evaluar la pertinencia desde una perspectiva funcional y comercial de los diseños propuestos.

### ***2.1.2. ETAPA DE INGENIERÍA BÁSICA***

También se conoce como etapa FEED, por sus siglas en inglés. Se presenta después de seleccionar una cantidad de opciones de desarrollo del proyecto y a continuación se realiza un análisis más detallado para elegir la configuración de los equipos principales. En esta etapa, se toman las decisiones más importantes con respecto al concepto y se realizan planes para el proyecto.

### ***2.1.3. INGENIERÍA DE DETALLE***

En esta etapa comienza la creación de los documentos de diseño iniciales; por ejemplo, los diagramas de flujo de procesos (PFD), Diagramas de proceso e instrumentación (P&ID), las listas de equipos y hojas de datos, permitiendo la especificación de un diseño mucho más detallado para el sistema. Por lo que, el análisis RAM tiene el objetivo garantizar que el diseño del sistema cumpla con los objetivos de desempeño requeridos. Desde la perspectiva de la inversión, se debe llegar a un equilibrio óptimo entre la Confiabilidad del sistema y los costos.

#### ***2.1.4. EJECUCIÓN***

En esta etapa el análisis RAM, sirve como complementación a otras metodologías para la planeación del mantenimiento, como la Inspección Basada en Riesgos (RBI, por sus siglas en inglés) y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés). Posteriormente con el resultado de los procesos RBI y RCM puede alimentarse nuevamente al modelo para proporcionar un escenario final del rendimiento del sistema.

#### ***2.1.5. ETAPA OPERATIVA***

Durante esta etapa, no es económicamente rentable tomar decisiones con respecto al diseño, sin embargo, el análisis RAM puede usarse para evaluar el impacto de las modificaciones planificadas. Siempre existe una compensación (trade-off) entre los costos de producción perdida versus los costos de mantenimiento. Por otro lado, se puede crear una tendencia de rendimiento en base al resultado de las actualizaciones continuas del análisis. Esto podría representar un rendimiento adicional si las áreas de interés son abordadas directamente.

#### ***2.1.6. RENOVACIÓN***

Esta etapa hace referencia a los sistemas ya deteriorados por el uso y el tiempo, aquí el análisis RAM ayuda a encontrar áreas potenciales para la renovación o la ampliación de la vida útil de una instalación. Se pueden aplicar muchos casos sensibles a un modelo de sistema maduro, lo que indicará varias opciones de renovación y la cuantificación de ganancias potenciales.

#### ***2.1.7. DESMANTELAMIENTO***

Esta es la etapa final de un proyecto, en la que se debe identificar en qué punto los gastos operativos superan los ingresos y hacen que el sistema ya no sea económicamente viable.

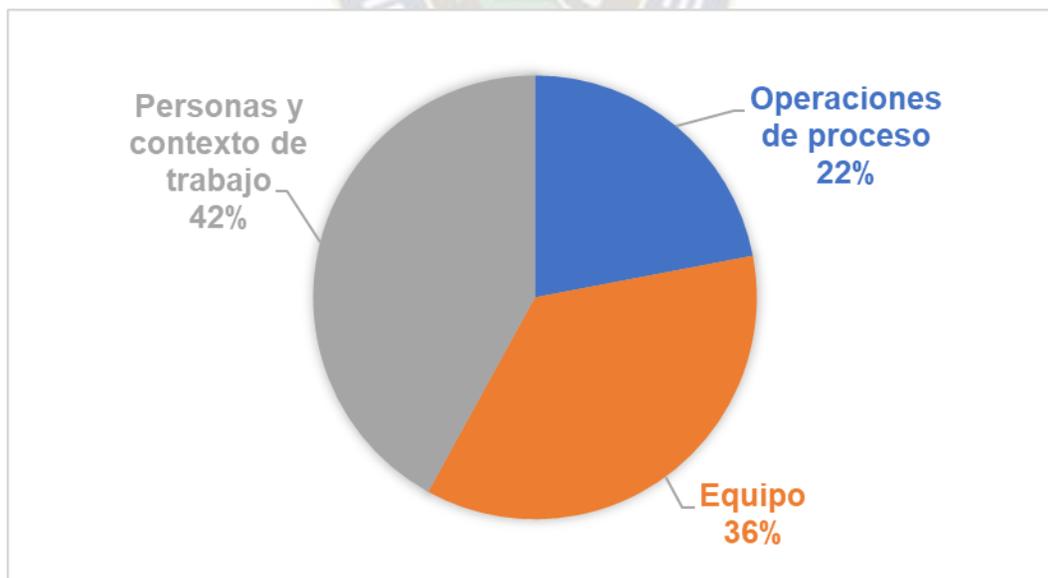
Mediante el modelado de todos los comportamientos dinámicos de un sistema, el análisis RAM ayuda a evaluar la viabilidad de las estrategias de desmantelamiento.

## 2.2. *IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS RAM*

### 2.2.1. *SITUACIONES ANORMALES*

Una situación anormal de un proceso puede definirse como cualquier problema o evento que requiera una acción inmediata para prevenir consecuencias graves, y las principales causas para su generación son las fallas de los equipos y subsistemas. El enfoque convencional en el manejo de situaciones anormales basadas en fallas generalmente se ha centrado en estrategias operativas. Este enfoque pasa por alto el papel crítico del diseño de procesos en la mitigación del fracaso, al mismo tiempo que no considera los efectos de dicho fracaso en el desempeño económico del proceso.

Figura 2-1: Causas principales de situaciones anormales



Fuente: Traducido y adaptado del artículo Mitigation of operational failures via an economic framework of reliability, availability, and maintainability (RAM) during conceptual design, Al-Douri, Kazantzi, Eljack, El-Halwagi, & Sam, 2020

“Bullemer y Reising (2015) compilaron informes de incidentes de situaciones anormales de cinco plantas en Europa y América del Norte para identificar sus fuentes. Si bien la mayoría de las situaciones anormales ocurrieron debido a una interacción de múltiples fuentes, los autores caracterizaron las causas de estas fallas en tres tipos básicos de fuentes: equipo, proceso y personas y contexto de trabajo” (Al-Douri, Kazantzi, Eljack, El-Halwagi, & Sam, 2020), tal como se muestra en la Figura 2-1.

### ***2.2.2. CONSECUENCIAS DE LAS SITUACIONES ANORMALES***

Las situaciones anormales basadas en fallas tienen una amplia gama de efectos en el proceso, ya que pueden reducir la calidad del producto, reducir las tasas de producción o causar paradas catastróficas, otras consecuencias de situaciones no menos importantes incluyen pagos de responsabilidad civil, aumento de las primas de seguro y daños a la imagen pública de la compañía. Las situaciones anormales basadas en fallos también plantean un desafío económico para la industria de procesos, ya que pueden provocar incendios y explosiones, cierres y paros no planificados, todo lo cual puede causar pérdidas financieras significativas para las plantas.

### ***2.2.3. BENEFICIOS DE UN ANÁLISIS RAM EN LA INDUSTRIA DE GAS Y PETRÓLEO***

Existen varias estimaciones sobre las ventajas económicas que un análisis RAM puede generar en la industria del gas y petróleo, según otra estimación Williams, 2001, las oportunidades típicas de mejora de la rentabilidad utilizando herramientas de RAM en el caso de las operaciones de refinería de petróleo, en EEUU, van desde 0.10 a 0.20 US\$/bbl. Para tener alguna perspectiva sobre la escala del ahorro, para una refinería de petróleo típica con un rendimiento de aproximadamente 30000 bbl/día, o

aproximadamente 198 m<sup>3</sup>/hr, el ahorro podría estar en el rango de aproximadamente 1 a 2 millones de dólares/año, mientras que, para rendimiento más bajos, podría estar en el rango de 10 a 20 millones de dólares/año.

A partir de las cifras antes mencionadas se puede inferir que es posible exprimir beneficios significativos mediante la implementación de diferentes herramientas de ingeniería de confiabilidad para aumentar la eficacia operacional de las plantas petroquímicas, refinerías y demás plantas de la industria hidrocarburiífera.

Por otro lado, aunque las oportunidades para mejorar el rendimiento económico de una planta no se limitan a la etapa operacional ya que existen a lo largo de su ciclo de vida, la rentabilidad de las alternativas disponibles para mejorar el rendimiento de la disponibilidad de la planta disminuye a medida que la planta pasa por la fase inicial de su ciclo de vida, es decir, desde la etapa de diseño hasta su etapa operativa, por lo que la aplicación del análisis RAM cobra importancia en dicha fase.

### **2.3. CONFIABILIDAD**

La Confiabilidad puede considerarse como la probabilidad de operación o desempeño exitosos de los sistemas y sus equipos relacionados, con un riesgo mínimo de pérdida, desastre o falla del sistema. (Stapelberg, 2009, pág. 5) En otras palabras, se puede entender como la probabilidad de que el sistema tenga un rendimiento satisfactorio bajo condiciones determinadas y constantes como ser la presión, temperatura, etc., ya sean reales o simuladas.

El diseño de la Confiabilidad se vuelve esencial para garantizar que los sistemas de ingeniería sean capaces de funcionar en los niveles de rendimiento requeridos y

especificados, y para garantizar que se gaste menos al alcanzar estos niveles de rendimiento. (Stapelberg, 2009, pág. 43)

Figura 2-2: Criterios de evaluación de la confiabilidad



Fuente: Elaboración propia con imágenes tomadas del libro Fundamental Of Natural Gas Processing e Internet

El análisis de la confiabilidad en la etapa de diseño de un proyecto de ingeniería puede ser realizado tomando en cuenta dos puntos de vista (Figura 2-2). El primer criterio consiste en una evaluación "de abajo hacia arriba" en la que la Confiabilidad se aborda desde el nivel más bajo del diseño (es decir, el nivel de componentes) hasta los niveles más altos del diseño (es decir, los niveles de montaje, sistema y proceso), mediante el cual se determina el efecto colectivo de la confiabilidad de todos los componentes en sus ensamblajes y sistemas en la jerarquía.

Por otro lado, puede considerarse como un desarrollo "de arriba hacia abajo" en el que el diseño de la confiabilidad se considera desde el nivel más alto del diseño (es decir, el nivel de proceso) hasta el nivel más bajo del diseño (es decir, el nivel de componente), mediante el cual se determinan los objetivos de confiabilidad impuestos al rendimiento de los sistemas, lo que finalmente afectará a los ensamblajes y componentes del sistema en la jerarquía. Este enfoque no depende de tener que identificar inicialmente todos los componentes del diseño, lo que es particular para las fases de diseño conceptual y preliminar del proceso de diseño de ingeniería.

### ***2.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD***

#### ***2.3.1.1. CLASIFICACIÓN POR SU DEFINICIÓN***

Los tipos de análisis o estudio de la confiabilidad, por su definición se clasifican en predicción, valoración y evaluación de la confiabilidad. Es importante señalar que la distinción de estos tres términos no es absolutamente clara, especialmente la valoración y la evaluación de la confiabilidad, y que la superposición de conceptos y técnicas similares se producirá en los límites entre estos.

##### **a) Predicción de la Confiabilidad:**

Se puede definir en su forma más simple como la estimación o pronóstico de la probabilidad del rendimiento u operación exitoso de los sistemas en condiciones sujetas a diversos modos de falla. Las técnicas que entran en esta categoría son más apropiadas durante el diseño conceptual, cuando se identifican sistemas alternativos u opcionales en su contexto general en diagramas de bloque preliminares, como diagramas de flujo de proceso (DFP).

## **b) Valoración de la Confiabilidad**

Puede definirse como la estimación de la probabilidad de que un elemento del equipo realice su función prevista para un intervalo especificado en las condiciones establecidas, y se basa en inferencias de fallos de los equipos de acuerdo con sus distribuciones de fallos estadísticos. Estas técnicas serían más apropiadas durante el diseño preliminar o esquemático.

## **c) Evaluación de la Confiabilidad**

Se puede definir como la determinación de la frecuencia con la que se producen fallas de los componentes durante un período de tiempo especificado, y se basa en valores conocidos de tasas de fallas para componentes.

Las técnicas para la evaluación de la Confiabilidad son más adecuadas durante el diseño de detalles.

### **3.2.1.2. CLASIFICACIÓN POR EL MÉTODO**

#### **a) Métodos cualitativos:**

Este tipo de métodos utilizan criterios subjetivos, producto de la experiencia laboral del profesional encargado de realizar el análisis de confiabilidad. Dentro de esta clasificación tenemos a las siguientes técnicas:

- **Análisis de árbol de fallo (AAF, en inglés FTA):** Determina las combinaciones de eventos que darán lugar a las causas raíz del error del componente. Indica los modos de error (en las estructuras de árbol de bifurcación) y las probabilidades de ocurrencia de errores.

- **Análisis de riesgos (AR, en inglés RA):** Combina el análisis de árbol de fallo con los efectos de la aparición de fallos catastróficos.

#### **b) Métodos cuantitativos**

Este tipo de valoración hace uso de índices numéricos, que pueden ser determinados usando modelos probabilísticos.

Los modelos probabilísticos son modelos matemáticos cuyas variables son aleatorias y no existe una función que determine resultados en un instante de tiempo dado, por lo que la ocurrencia de determinados valores se expresa en términos de probabilidad. Estos modelos se dividen a su vez en analíticos o de simulación.

- **Modelo analítico:** El sistema estudiado se representa por una ecuación o conjunto de ecuaciones, obteniéndose los índices de confiabilidad por medio de soluciones matemáticas directas. En esta clasificación se tienen a los Diagramas de Bloques, Proceso de Markov, Funciones probabilísticas Exponencial, Gamma y Weibull.
- **Modelo de simulación:** Se simula el comportamiento aleatorio del componente o sistema y se evalúan los índices de confiabilidad en forma indirecta por medio de técnicas numéricas. Este método requiere conocer los modelos matemáticos de los componentes o de algunas variables del proceso aleatorio bajo estudio. Lo que se obtiene artificialmente es la solución de una o varias variables que son función de las variables conocidas y de los cambios en el proceso del sistema. (Zapata, 2011, pág. 9) Como ejemplo se tiene la Simulación de Monte Carlo.

#### **c) Métodos Mixtos**

Existen métodos que combinan el análisis cualitativo y modelos analíticos o de simulación. Entre estos se tiene:

- Análisis De Los Modos De Fallo, Efecto Y Criticidad (AMFEC, en inglés FMCA):
- Definición y cuantificación de fallas (DCF, en inglés FDQ)
- Análisis de eliminación de fallos (AEF, en inglés FEA)

### ***2.3.2. DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE COMPONENTES (EQUIPOS) EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL***

La Confiabilidad de un componente se puede definir como “probabilidad de que un elemento realice su función prevista para un intervalo especificado en las condiciones indicadas” (MILITARY STANDARD: DEFINITIONS OF TERMS FOR RELIABILITY AND MAINTAINABILITY) ”.

Esta probabilidad, en su forma más simple, es la relación entre el número de componentes que sobreviven a una prueba de error y el número de componentes presentes al principio de la prueba.

#### ***2.3.2.1. DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CONFIABILIDAD***

La probabilidad es la medida clásica para valorar la confiabilidad. Sin embargo, existen muchas otras medidas utilizadas extensamente, por lo cual, “confiabilidad” es un término genérico que describe todas estas medidas sin que necesariamente estén relacionadas con la probabilidad.

Gran parte de estas medidas corresponden a promedios estadísticos o valores esperados que se denominan “índices de confiabilidad”. (Zapata, 2011, pág. 10).

Tabla 2-1: Índices de confiabilidad estadísticos

Definiendo:	
<b>T</b>	Tiempo de estudio o periodo de los registros, generalmente [años]
<b>n</b>	Número total de salidas en el periodo T
<b>n<sub>f</sub></b>	Número de fallas en el periodo T
<b>N</b>	Número de componentes o longitud total de los componentes
<b>X</b>	Longitud desconectada en una salida o falla
<b>X<sub>PR</sub></b>	Longitu promedia desconectada en una salida o falla
<b>tto</b>	Tiempo para salida planeada, no planeada o falla
<b>r</b>	Tiempo medio para reparación
<b>MTTR</b>	Tiempo medio para restauración (reconexión de salidas planeadas y no planeadas)
Tasas de salidas	
Ecuación	Observación
$\lambda_0 = n / (N * T - \sum_{i=1}^n ttr_i)$	Aplica a uno o varios componentes no longitudinales.
$\lambda_0 = n / (N * T - \sum_{\forall i \in falla}^{n_f} ttr_i)$	Aplica a uno o varios componentes longitudinales, si en cada falla se desconecta toda la longitud.
$\lambda_0 = n / (N * T - \sum_{\forall i \in falla}^{n_f} ttr_i X_i)$	Aplica a uno o varios componentes longitudinales, si en cada falla se desconecta una longitud diferente.
$\lambda_0 = n / (N * T - X_{PR} \sum_{\forall i \in falla}^{n_f} ttr_i)$	Aplica a uno o varios componentes longitudinales, si en cada falla se desconecta una longitud promedio.
Tasas de falla	
Ecuación	Observación
$\lambda = n_f / (N * T - \sum_{i=1}^{n_f} ttr_i)$	Aplica a uno o varios componentes no longitudinales.
$\lambda = n_f / (N * T - \sum_{\forall i \in falla}^{n_f} ttr_i)$	Aplica a uno o varios componentes longitudinales, si en cada falla se desconecta toda la longitud.
$\lambda = n_f / (N * T - \sum_{\forall i \in falla}^{n_f} ttr_i X_i)$	Aplica a uno o varios componentes longitudinales, si en cada falla se desconecta una longitud diferente.
$\lambda = n_f / (N * T - X_{PR} \sum_{\forall i \in falla}^{n_f} ttr_i)$	Aplica a uno o varios componentes longitudinales, si en cada falla se desconecta una longitud promedio.

$\lambda_0 = 1/MTTR$	Expresión aproximada, muy utilizada en la práctica.	
<b>Tasas de restauración y reparación</b>		
<b>Ecuación</b>	<b>Observación</b>	
$\mu_0 = 1/MTTR$	Tasa de restauración	
$\mu = 1/r$	Tasa de reparación	
<b>Tiempos medios</b>		
<b>Tiempo medio para salida</b>	$MTTO = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n tto_i$	Aclarar si los tto se refieren a un componente o a un grupo de componentes.
	$MTTO = 1/\lambda_0$	Se aplica cuando no se tienen tiempos para salida.
<b>Tiempo medio para el fallo</b>	$MTTF = m = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} tto_i$	Aclarar si los ttf se refieren a un componente o a un grupo de componentes.
	$MTTF = 1/\lambda$	Se aplica cuando no se tienen los tiempos para falla.
<b>Tiempo medio para restauración</b>	$MTTRS = (\sum_{i=1}^n ttr_i)/n$	
<b>Tiempo medio para reparación</b>	$MTTR = r = (\sum_{i=1}^{n_f} ttr_i)/n_f$	

Fuente: Confiabilidad en Ingeniería, Zapata, Carlos J., 2011, pág. 78

### 2.3.2.2. DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE COMPONENTES NO REPARABLES

Como se mencionó anteriormente, los componentes no reparables se caracterizan porque su vida operativa termina cuando se presenta una falla, ya que no pueden ser restaurados, por lo que deben ser reemplazados. Esta definición es, generalmente aplicada a los elementos individuales de equipos cuyo mantenimiento no se puede realizar o su reemplazo es mucho más fácil y económico que su reparación.

Cuando se realiza un análisis de confiabilidad a componentes no reparables, las variables que más se toman en cuenta son el Tiempo Medio Para el Fallo (MTTF)<sup>1</sup>, que “corresponde a la media de la distribución de la variable aleatoria tiempo para el fallo” (Gomez de la Vega, Valbuena, & Yañez Medina, 2004, pág. 193), y en este contexto, es igual a el tiempo de operación (t) que puede ser igual o superior al tiempo de misión (t<sub>m</sub>).

Por lo tanto, la confiabilidad de estos componentes se representa matemáticamente como:

Partiendo de la función de densidad de probabilidades de t:

$$f(t)$$

La confiabilidad se expresa como la función acumulada inversa de  $f(t)$ :

$$C(t_m) = \Pr(t \geq t_m) = \int_{t_m}^{\infty} f(t) dt \quad (2-1)$$

Expresando (2-1) en función a la función acumulada directa de  $f(t)$ , se tiene:

$$C(t_m) = \int_{t_m}^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_{-\infty}^{t_m} f(t) dt = 1 - F(t) \quad (2-2)$$

Dónde:

t = Tiempo de operación para la falla

t<sub>m</sub> = Tiempo de misión [hr]

Pr(t ≥ t<sub>m</sub>) = Probabilidad de que t sea mayor o igual que t<sub>m</sub>

<sup>1</sup> MTTF proviene de las siglas de las palabras en inglés “Mean Time To Failure”

$f(t)$  = Función de densidad de probabilidades de  $t$ .

$F(t)$  = Función acumulada directa de  $f(t)$

$C(t_m)$  = Confiabilidad en función de  $t_m$

En la siguiente tabla se encuentran las distribuciones probabilísticas más usadas para el análisis de confiabilidad de los equipos no reparables, y la tabla muestra las ecuaciones para el cálculo de sus respectivos parámetros.

Tabla 2-2: Ecuaciones para diversas distribuciones de probabilidad

Distribución	$f(t)$	$F(t)$	$C(t)$	$h(t)$	TPPF
Exponencial	$\lambda e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda$	$\frac{1}{\lambda}$
Weibull	$\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$	$\alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
Gamma	$\frac{t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t}{\beta}}$	$\frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt$	$1 - F(t)$	$\frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$\beta \alpha$
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$	$1 - F(t)$	$\frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$\mu$
Log-Normal	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$\int_0^\infty f(t) dt$	$1 - F(t)$	$\frac{f(t)}{1 - F(t)}$	$e^{\left[\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right]}$

Fuente: Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo, Gomez de la Vega, Valbuena, & Yañez Medina, 2004, pág. 203

### 2.3.2.3. DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE COMPONENTES REPARABLES

Un componente reparable permite la restauración de sus funciones al ser reparado, lo cual implica que durante su vida puede sufrir más de una falla. Por lo que, para el análisis de la confiabilidad, las variables a tomarse en cuenta son el Tiempo Medio Entre Fallas

(MTBF)<sup>2</sup>, el tiempo de operación entre fallas ( $t_i$ ), el Número Esperado de Fallas ( $\Lambda(T)$ ), Tiempo acumulado de operación ( $T$ ), Tasa de ocurrencia de fallas ( $\lambda(T)$ ) y el Número Acumulado de fallas ( $N(T)$ ).

Por otro lado, para la evaluación de la confiabilidad de los sistemas reparables, se tienen los métodos descritos a continuación.

#### **a) Proceso ordinario de restauración**

Este método “asume que el sistema es restaurado a su condición original cada vez que se repara; es decir, que el equipo queda tan bueno como nuevo” (Gomez de la Vega, Valbuena, & Yañez Medina, 2004, pág. 223). Por lo cual se asume lo siguiente:

- El escenario es ideal.
- Se reemplazan, simultáneamente, todos los componentes que fallen.
- Las variables son aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas.
- La duración de restauración es insignificante en comparación al tiempo de operación de los componentes o equipos.
- “La distribución del tiempo entre fallas, puede seguir cualquier distribución continua” (Modarres, Kaminskiy, & Krivtsov, 1999, pág. 285)

Tomando en cuenta el último punto, ecuaciones de las distribuciones y de los parámetros mostradas en la Tabla 2-2 , pueden ser utilizadas para describir el comportamiento de las variables citadas.

---

<sup>2</sup> MTBF proviene de las siglas de las palabras en inglés “Mean Time Between Failures”

Por otro lado, la variable Número Esperado de Fallas ( $\Lambda(T)$ ) se puede calcular con ayuda del Método de Montecarlo y la siguiente ecuación:

$$\Lambda(T) = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{m} \quad (2-3)$$

Dónde:

$n_i$  = Número de fallas observadas al tiempo T

$m$  = Número de iteraciones

#### **b) Proceso no homogéneo de Poisson (PNHP)**

Este método asume que “al fallar, el sistema es sometido a una reparación mínima y que, por lo tanto, el equipo queda tan malo como estaba justo antes de la falla” (Gomez de la Vega, Valbuena, & Yañez Medina, 2004). Es utilizado cuando los sistemas son muy complejos y sólo se busca realizar una mínima reparación para poner al sistema a operar nuevamente.

#### *2.3.2.4. ACTUALIZACIÓN DE LOS DATOS DE FALLA DE EQUIPOS*

Una consideración importante para tomar durante el análisis de confiabilidad de un sistema, durante la etapa de diseño de un proyecto, es que se cuenta únicamente con datos referenciales, provenientes de datos genéricos o datos estadísticos (específicos) de proyectos similares que ya se encuentren en operación.

Ambas fuentes de información muestran problemas, los datos genéricos no reflejan las características y condiciones de la planta bajo la que se operará el equipo, por lo que no ayudarían a la estimación realista de confiabilidad de la planta bajo estudio.

Por otro lado, los datos específicos de plantas no son estadísticamente válidos debido a una corta duración de recopilación o a una población limitada de equipos, por lo que no llegan a ser representativos de los equipos. Debido a esto, es necesario realizar una actualización estadística de los indicadores que disponemos, esto se realizará con ayuda del teorema de Bayes.

#### **a) Descripción del Teorema de Bayes**

Las estadísticas bayesianas se basan en la definición subjetiva de probabilidad, como grado de creencia, bajo este enfoque, la existencia de información adicional a los datos conocidos, denominado como evidencia, modifica el grado de conocimiento o grado de creencia de una proposición y por lo tanto, debe ser tomada en cuenta para reevaluar la probabilidad de un evento (Gomez de la Vega, Valbuena, & Yañez Medina, 2004).

Basados en lo anterior, “el teorema de Bayes, permite tratar la experiencia de otros como “conocimiento previo (Prior Knowledge)”, normalmente representado por una distribución de probabilidades; y a nuestra experiencia (datos propios) o sentido común (opinión de expertos) como “evidencia (Evidence). Ambas son combinadas matemáticamente, obteniendo una distribución de probabilidades modificada conocida como “conocimiento posterior, mejorada o actualizado (Posterior Knowledge)”” (Yañez & Semeco, 2005, págs. 1-2).

La expresión matemática del teorema de Bayes en la siguiente:

$$Pr(A|E) = \frac{Pr(A) * Pr(E|A)}{Pr(E)} \quad (2-4)$$

Dónde:

A = Evento aleatorio a previo

E = Evento aleatorio, evidencia

Pr(A) = Probabilidad de ocurrencia del evento A o probabilidad previa

Pr (E) = Probabilidad de ocurrencia del evento E

Pr(E | A) = Probabilidad de verosimilitud

Pr(A | E) = Probabilidad del evento E dado que ocurrió el evento A, o probabilidad a posteriori

### **b) Adecuación del teorema de Bayes para el análisis de confiabilidad**

Al adecuar el teorema de Bayes al análisis de confiabilidad, las variables aleatorias corresponderían a la tasa de fallas ( $\lambda$ ) y a los tiempos para la falla ( $t$ ), las funciones previa  $g(\lambda)$  y posterior  $f(\lambda|t)$  son funciones de distribución y  $L(t|\lambda)$  es la función de verosimilitud o función de probabilidad de la evidencia o muestra.

$$f(\lambda|t) = \frac{L(t|\lambda)g(\lambda)}{\int_{-\infty}^{\infty} L(t|\lambda)g(\lambda)} \quad (2-5)$$

Para la descripción de las ecuaciones, es importante mencionar previamente las siguientes consideraciones:

La fuente de información previa es OREDA, cuya distribución de tasas de falla corresponde a una distribución GAMMA.

Se asume que los tiempos para la falla “t”, están distribuidos exponencialmente. Lo cual es razonable cuando el análisis se hace a nivel de equipos sin discriminar por el componente que causó la falla (Yañez & Semeco, 2005).

Así, para la función previa se tiene que:

$$g(\lambda) = \frac{\beta^\alpha \lambda^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\beta\lambda}$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{\bar{\lambda}^2}{\sigma_\lambda^2} \quad y \quad \beta = \frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda^2} \quad (2-6)$$

$DS_\lambda$  = desviación estándar de la muestra

$\bar{\lambda}$  = tasa de fallas media de la muestra [fallas/hora], obtenida de datos genéricos

Reemplazando en (2-6)

$$g(\lambda) = \frac{\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda^2} \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2 \lambda \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^{-1}}{\Gamma\left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2} e^{-\left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)\lambda} \quad (2-7)$$

Para la función de verosimilitud se tiene:

$$L(t|\lambda) = \prod_{i=1}^r f(t_i, \lambda) * \prod_{j=1}^{N-r} C(t_{cj}, \lambda) \quad (2-8)$$

Dónde:

r = Número de fallas observadas en la población de equipos

$t_i$  = tiempos de falla

$N-r$  = Número de datos censados o equipos no fallados

$t_{cj}$  = Tiempos de operación de equipos desde su última falla (datos censados)

$\lambda$  = Parámetro de la distribución de probabilidad de la variable “tiempo para la falla”.

$f(t_i, \lambda)$  = Función de densidad de probabilidad; con parámetro  $\lambda$  y evaluada en el valor  $t_i$ .

$C(t_{cj}, \lambda)$  = Función de confiabilidad con parámetro  $\lambda$ ; evaluada en el valor  $t_{cj}$ .

Además, como los  $t$  están distribuidos de forma exponencial, se tiene que:

$$f(t_i, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$C(t_{cj}, \lambda) = e^{-\lambda t}$$

Reemplazando en (2-8) y resolviendo se tiene:

$$L(t|\lambda) = \lambda^r e^{-\lambda T} \quad (2-9)$$

Dónde:

$T$  = Tiempo total de operación acumulado por la población de equipos.

Finalmente, reemplazando las ecuaciones (2-7) y (2-9) en (2-5) y resolviendo, se tiene la función posterior o actualizada:

$$f(\lambda|t) = \frac{\left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda^2} + T\right)^{\left(r + \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2\right)} \lambda^{\left(r + \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2 - 1\right)} e^{-\left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda^2} + T\right)\lambda}}{\Gamma\left(r + \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2\right)} \quad (2-10)$$

Adicionalmente se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{actualizada} = \frac{r + \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2}{T + \frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda^2}} \quad (2-11)$$

$$\sigma_{\lambda actualizada} = \frac{\sqrt{r + \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda}\right)^2}}{T + \frac{\bar{\lambda}}{\sigma_\lambda^2}} \quad (2-12)$$

### ***2.3.3. DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL***

Un sistema consta de varios componentes de los que uno o más deben estar trabajando para que el sistema funcione. En este caso, se considera la Confiabilidad de todo el sistema, y no necesariamente la Confiabilidad de un componente individual.

Existen diferentes métodos para calcular la confiabilidad del sistema, algunos de los cuales serán descritos a continuación.

#### ***2.3.3.1. DIAGRAMAS DE BLOQUES DE CONFIABILIDAD***

“Un diagrama de bloques de confiabilidad es una representación gráfica de cómo los componentes de un sistema están conectados en términos de confiabilidad... Donde cada componente de un sistema se representa como un bloque que está conectado en serie, y/o

en paralelo, basado en la dependencia operacional entre los componentes.” (Goel, 2004, págs. 15-16).

Para el uso de este método, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sólo existen dos estados operativos: Bueno-Fallado; Disponible-Indisponible
- Las fallas son independientes entre sí.

**a) Sistema conectado en serie**

Cuando los componentes de un sistema se conectan en serie, como se muestra en la Figura 2-3, el fallo de una pieza o componente causa la pérdida de producción o indisponibilidad de todo el sistema, por lo que la Confiabilidad en una configuración de serie es menor que la Confiabilidad de cada componente. Esto se representa matemáticamente de la siguiente forma:

$$C_{Sistema} = C_{Componente 1} \times C_{Componente 2} \times C_{Componente 3} \dots \times C_{Componente n} \quad (2-13)$$

Dónde:

$$C_{Sistema} = \text{Confiabilidad del sistema}$$

$$C_{Componente} = \text{Confiabilidad de los componentes}$$

Por lo cual, este tipo de configuración del sistema sigue la ley de la multiplicación que señala lo siguiente:

"Si dos o más eventos son independientes, la probabilidad de que se produzcan todos los eventos es dada por el producto de sus respectivas probabilidades de ocurrencias individuales". (Stapelberg, 2009, pág. 48)

De este modo, la ecuación (2-13) más atrás puede expresarse, de manera abreviada, como:

$$C_{Sistema} = \prod_{n=1}^n C_{Componente\ i} \quad ; \quad \forall n = 1, 2, \dots, n \quad (2-14)$$

Figura 2-3: Componentes de un sistema conectados en serie



Fuente: Elaboración propia

#### **b) Sistema conectado en paralelo**

Por otro lado, cuando los componentes de un sistema se configuran en paralelo Figura 2-4, un componente puede servir como una unidad respaldo (back-up) para el otro, en caso de que uno u otro componente falle, lo que quiere decir que el sistema requiere que sólo un componente esté funcionando para que todo el sistema sea funcional. Por lo tanto, La Confiabilidad del sistema de una configuración paralela es mayor que la Confiabilidad de cada componente individual. Esto se expresa con la siguiente ecuación:

$$C_{Sistema} = (C_{Componente 1} + C_{Componente 2}) - (C_{Componente 1} \times C_{Componente 2}) \quad (2-15)$$

Dónde:

$C_{Sistema}$  = Confiabilidad del sistema

$C_{Componente}$  = Confiabilidad de los componentes

Este tipo de configuración se basa en la siguiente ley de probabilidad llamada la ley general de adición:

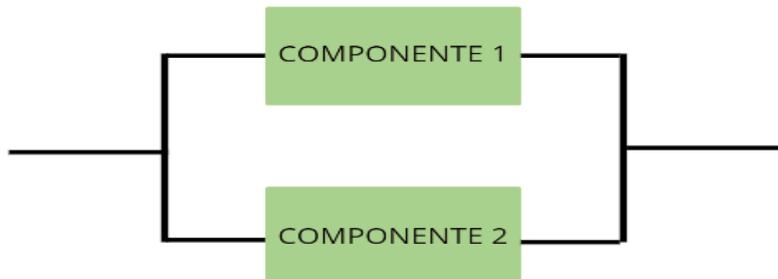
"Si dos eventos pueden ocurrir simultáneamente (es decir, en paralelo), la probabilidad de que uno o ambos ocurran se da por la suma de las probabilidades individuales de ocurrencia menos el producto de las probabilidades individuales".

(Stapelberg, 2009, pág. 50)

Por lo que la ecuación (2-15) se puede expresar como:

$$C_{Sistema} = \sum_{i=1}^n C_{Componente i} - \prod_{i=1}^n C_{Componente i} \quad ; \quad \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (2-16)$$

Figura 2-4: Componentes de un sistema conectados en paralelo



Fuente: Elaboración propia

“Estas ecuaciones matemáticas demuestran que, al incrementarse el número de componentes dispuestos en serie, la Confiabilidad disminuye, y lo contrario ocurre cuando el número de componentes dispuestos en paralelo aumentan; es por esta razón que las configuraciones de sistema paralelas (o redundantes) se utilizan a menudo cuando se requiere una alta Confiabilidad, aunque esto supone un incremento en costos, espacio y peso del sistema.” (Stapelberg, 2009)

### c) Sistemas conectados en paralelo y en serie

Para sistema más complejos, con componentes dispuestos en paralelo y en serie, el cálculo de la Confiabilidad del sistema se realizará en base a la combinación de las anteriores configuraciones, tomando en cuenta que deben reducirse a un sistema simplificado en serie.

Figura 2-5: Configuración de un sistema conectado en paralelo y en serie



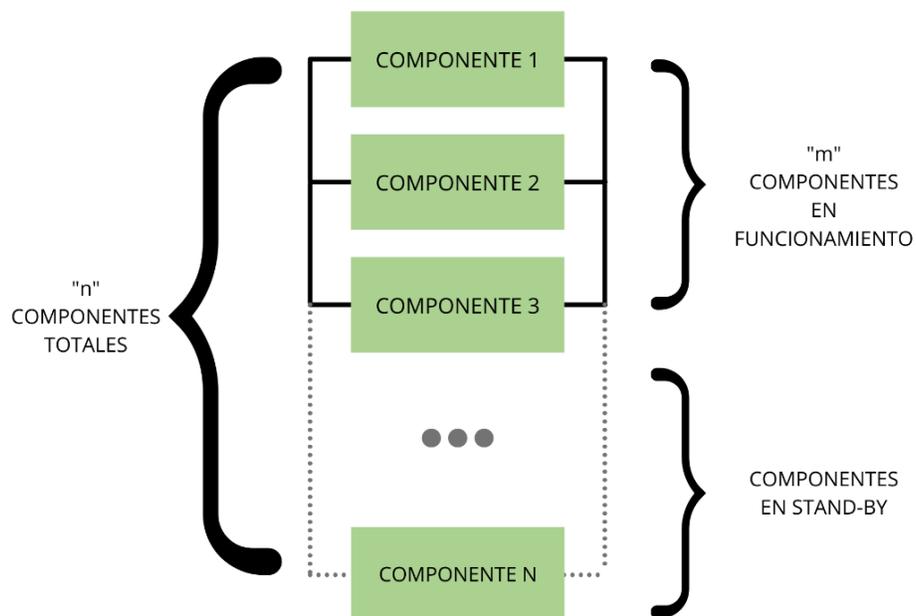
Fuente: Elaboración propia

#### d) Votación “m” de “n”

Existen dos tipos de sistemas redundantes:

- Redundancia activa: Donde todos los elementos están activos durante la operación y el fallo de uno de ellos es asumido en cuanto a funciones por los demás. Lo cual correspondería a la configuración en paralelo
- Redundancia pasiva (en stand-by o secuencial): En este tipo de sistema existe elementos duplicados (normalmente parados) con capacidad de reemplazar al principal cuando se les da la orden como consecuencia del fallo. El elemento redundante permanece inactivo hasta el fallo, lo cual implica un número de componentes mayor al requerido que permita el incremento de la confiabilidad global del sistema.

Figura 2-6: Sistema en paralelo “m” de “n”



Fuente: Elaboración propia

En la figura Figura 2-6, se observa el sistema redundante con “n” componentes, de los cuales sólo “m” se mantendrán en operación. La confiabilidad del sistema se calculará con la siguiente ecuación:

$$C_{Sistema} = \sum_{r=1}^n \binom{n}{r} (C_{Componente\ i})^r (1 - C_{Componente\ i})^{n-r} \quad (2-17)$$

Dónde:

n = número total de componentes en paralelo

m = número mínimo de componentes requeridos

$C_{Componente\ i}$  = Confiabilidad de cada componente

#### 2.3.3.2. *MODELO DE MARKOV*

“El modelo de Markov provee una técnica poderosa de modelamiento y análisis con aplicaciones sobre análisis de confiabilidad basada en tiempos y disponibilidad. El comportamiento de confiabilidad/disponibilidad de un sistema se representa mediante un diagrama de transición de estado, que consta de un conjunto de estados discretos en los que puede estar el sistema y defina la velocidad a la que tienen lugar las transiciones entre estos estados. La transición de un estado al siguiente estado depende únicamente del estado actual, independientemente de cómo haya llegado el sistema a ese estado.”

(Goel, 2004, pág. 16)

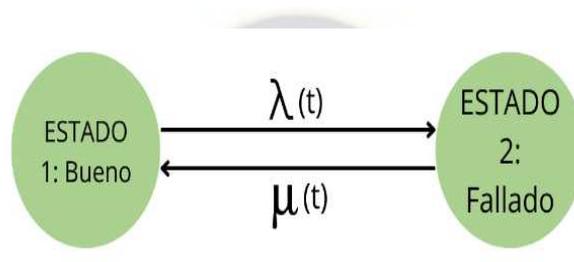
Este método es representa un análisis mucho más completo que el anterior, sin embargo, es también más complejo ya que se pueden realizar las siguientes consideraciones:

- El número de estados operativos puede ser cualquiera, dependiendo del análisis.

- Los modos de falla pueden ser dependientes unos de otros.
- Las tasas de falla y de reparación pueden ser constantes o variables con el tiempo.

La cadena de Markov más sencilla para sistemas reparables es la de dos estados que se muestra en la Figura 2-7.

Figura 2-7: Modelo de cadena de Markov de dos estados para un componente reparable



Fuente: Adaptado de Confiabilidad en Ingeniería, Zapata, 2011, página 42

### 2.3.3.3. ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF)

“El análisis de Modo y Efecto de Falla... Es una metodología y prevención de problemas en los procesos, diseños y fabricación de productos o prestación de servicios... En el AMEF se asume que un modo de falla ocurre en un sistema, proceso o componente a través de algún mecanismo que no funciona según lo diseñado. Los efectos de la falla se evalúan, al igual que sus causas, y se establece una clasificación para priorizar la atención en cada uno de los modos de falla. Con esto busca minimizar los riesgos asociados a las fallas, antes de que ocurran y afecten a los usuarios.”

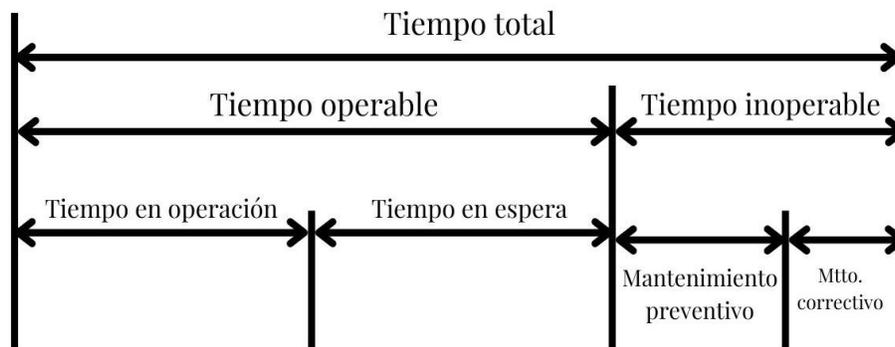
La fortaleza del AMEF es que se puede aplicar en diferentes niveles de jerarquía de sistemas y puede realizarse de diversas maneras en función del objetivo de la evaluación, el alcance de la definición y el desarrollo de los sistemas y la información disponible sobre los ensamblajes y componentes de un sistema en el momento del análisis.

## 2.4. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad o disponibilidad, puede definirse como “la probabilidad de que un sistema esté en servicio durante un período de funcionamiento programado” (Stapelberg, 2009, pág. 296), el objetivo de este indicador es medir la eficiencia de los equipos, por lo que se busca optimizarlo identificando las diferentes opciones para mejorarla mediante la evaluación de resultados respectivos con criterios específicos como *costos* y *beneficios*, y la cuantificación de su probabilidad de ocurrencia.

Para el diseño de la disponibilidad se considera principalmente los sistemas del diseño y en un nivel de equipo más alto (es decir, el nivel de montaje y no el nivel de componente), mediante el cual se determinan los requisitos de disponibilidad basados en el rendimiento esperado de los sistemas, lo que finalmente afecta a todos los elementos de la jerarquía de sistemas.

Figura 2-8: Tiempos para el análisis de la disponibilidad



Fuente: Adaptado de Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering in Design, Stapelberg, 2009, pág 297

“Garantizar un análisis adecuado en la determinación de la disponibilidad en el diseño de ingeniería es una de las pocas alternativas que los ingenieros de diseño pueden tener para

obtener un aumento en la capacidad de los procesos y/o sistemas, sin incurrir en aumentos significativos en los costos de capital.” (Stapelberg, 2009, pág. 297)

Otro beneficio importante de poder utilizar el análisis de disponibilidad durante el proceso de diseño de ingeniería es que sirve como plataforma para apoyar el diseño de confiabilidad y diseño para los parámetros de mantenimiento, así como las compensaciones entre estos parámetros.

#### **2.4.1. DEFINICIONES DE DISPONIBILIDAD**

Existen tres definiciones básicas de disponibilidad:

- La **disponibilidad inherente** se puede definir como "la predicción del rendimiento esperado del sistema o la operatividad del sistema durante un período que incluye el tiempo de funcionamiento del sistema previsto y el tiempo de inactividad de mantenimiento correctivo previsto" (Stapelberg, 2009, pág. 303). Las técnicas para la predicción de este tipo de disponibilidad son más adecuadas durante el diseño conceptual.
- La **disponibilidad alcanzada** se puede definir como "la evaluación de la operatividad del sistema o el uso del equipo en un entorno simulado, durante un período que incluye su tiempo de funcionamiento previsto y el tiempo de inactividad de mantenimiento activo" (Stapelberg, 2009, pág. 303). Su determinación tiene cobra más relevancia durante el diseño esquemático.
- La **disponibilidad operativa** puede definirse como "la evaluación del uso potencial del equipo en su entorno operativo previsto, durante un período que incluye su tiempo de funcionamiento previsto, tiempo de espera y tiempo de inactividad de mantenimiento

activo y retrasado" (Stapelberg, 2009, pág. 303). Su predicción es más apropiada durante el diseño detallado.

#### ***2.4.2. TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD***

Las definiciones de disponibilidad son cualitativas en distinción e indican diferencias significativas en los enfoques en la determinación del diseño para la disponibilidad en diferentes niveles de la jerarquía de sistemas, tales como:

- a) **Predicción de la disponibilidad inherente de los sistemas:** Basada en un pronóstico de la operatividad de los sistemas y el rendimiento de los sistemas en condiciones sujetas a diversos criterios de rendimiento, la aplicación de esta técnica es la más adecuada para el diseño conceptual.
- b) **Evaluación de la disponibilidad alcanzada:** Está basada en inferencias del uso del equipo con respecto al tiempo de inactividad y el mantenimiento. Es la técnica más adecuada para la etapa de diseño de ingeniería básica.
- c) **Evaluación de la disponibilidad operativa:** basada en medidas de tiempo sujetas a retrasos, especialmente con respecto a los valores previstos de tiempo de inactividad administrativo y logístico. Su aplicación es más adecuada para la etapa de diseño detallado.

#### ***2.4.3. DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE COMPONENTES (EQUIPOS) EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL***

En condiciones iniciales de incertidumbre, es factible definir la disponibilidad del sistema sólo en términos de tiempo operable y mantenimiento correctivo. La disponibilidad definida de esta manera se denomina disponibilidad inherente ( $A_i$ ). En tales condiciones

idealizadas, se ignoran los tiempos de espera y retraso asociados con el mantenimiento programado o preventivo, así como el tiempo de inactividad administrativo y logístico. Por lo tanto, la disponibilidad inherente es útil para determinar las características operativas iniciales del sistema en condiciones especificadas.

Como este indicador examina la disponibilidad desde una perspectiva de diseño; por lo tanto, la fiabilidad y la mantenibilidad se consideran medidas complementarias en la ecuación de disponibilidad inherente. La disponibilidad inherente es en efecto un modelo de medidas de fiabilidad y mantenimiento. La ecuación de disponibilidad inherente se da como:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (2-18)$$

Dónde:

$A_i$  =Disponibilidad inherente [adimensional]

MTBF = es el Tiempo Medio Entre Fallas [hr]<sup>3</sup>

MTTR = Es el Tiempo Medio de Reparación [hr]<sup>4</sup>

“La disponibilidad inherente es el mayor valor de disponibilidad que se puede lograr porque sólo los tiempos relacionados con las interrupciones operativas debido a averías y su reparación son considerados, mientras que el tiempo de inactividad asociado con el mantenimiento planificado, así como el tiempo de inactividad administrativo y logístico se ignoran.” (Stapelberg, 2009, pág. 344)

---

<sup>3</sup> El acrónimo MTBF proviene del inglés Mean Time Between Failures

<sup>4</sup> El acrónimo MTTR proviene del inglés Mean Time To Repair

Para una distribución exponencial, el tiempo medio entre fallas se puede calcular con la siguiente relación:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2-19)$$

Dónde:

$\lambda$  = Tasa de Fallos

**NOTA:** Para el análisis de la disponibilidad de sistemas, se tienen los mismos métodos que para el análisis de la confiabilidad. Sin embargo, el método más utilizado es el de diagrama de bloques, el cual fue descrito en el anterior capítulo.

## **2.5. MANTENIBILIDAD**

Este indicador se puede definir como “la probabilidad de restauración del sistema dentro de un tiempo de inactividad especificado” (Stapelberg, 2009, pág. 296). En otras palabras, la capacidad de mantenimiento es la probabilidad de que un artículo se restablezca a una condición reparable mediante medidas de mantenimiento correctivo, de acuerdo con los procedimientos estándar prescritos, dentro de un período de tiempo determinado.

Una manera eficaz de aumentar la disponibilidad de un sistema es mejorar su mantenibilidad minimizando el tiempo de inactividad. Este tiempo de inactividad minimizado no ocurre al azar; está diseñado para suceder asegurando activamente que se consideren los requisitos de mantenimiento, de forma adecuada, durante las fases de diseño conceptual, esquemático y de detalle. Por lo tanto, deben garantizarse las características inherentes de mantenimiento del sistema y de su equipo. Es necesario

resaltar que la mantenibilidad es una consideración de diseño, mientras que el mantenimiento es una consecuencia de ese diseño. Sin embargo, en las primeras etapas del diseño de ingeniería, es importante identificar el concepto de mantenimiento y derivar los requisitos de mantenimiento del sistema inicial y los atributos de diseño relacionados. Esto constituye un análisis de la mantenibilidad.

### **2.5.1. ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO**

**a) El análisis de mantenimiento:** Incluye la predicción y evaluación de los criterios de mantenimiento a lo largo del proceso de diseño de ingeniería, y normalmente sería implementado por un programa bien definido, y capturado en un plan de programa de mantenimiento (MPP). Este difiere significativamente de una fase de diseño a la siguiente, particularmente con respecto a un enfoque a nivel de sistemas durante las primeras fases de diseño conceptual e ingeniería básica, en contraste con un enfoque a nivel de equipo durante las fases posteriores de diseño esquemático y detallado. Estas diferencias de enfoque tienen un impacto significativo en el mantenimiento en el diseño de ingeniería, así como en las responsabilidades del contratista/fabricante.

La mantenibilidad es una consideración de diseño, mientras que el mantenimiento es una consecuencia de ese diseño. Sin embargo, en las primeras etapas del diseño de ingeniería, es importante identificar el concepto de mantenimiento y derivar los requisitos iniciales de mantenimiento del sistema y los atributos de diseño relacionados.

**b) El modelado de la capacidad de mantenimiento:** Es, en cierta medida, una forma de análisis de probabilidad aplicado, muy similar a la evaluación de probabilidad de incertidumbre en la fiabilidad. La aplicación de modelos de mantenibilidad mejora la

capacidad de diseñar para el mantenimiento mediante la consideración adecuada de criterios de diseño como visibilidad, accesibilidad, capacidad de prueba e intercambiabilidad. El uso de técnicas de predicción de mantenimiento, así como modelos de análisis de mantenimiento cuantitativo específicos relacionados con los requisitos operativos de un diseño pueden mejorar en gran medida no sólo la integridad del diseño de ingeniería, sino también la confianza en las capacidades operativas de un diseño

- c) **El diseño para la mantenibilidad:** Requiere un producto que sea utilizable (debe ser fácilmente reparado) y compatible (debe mantenerse de manera rentable en, o restaurado a, una condición utilizable). Si el diseño incluye una característica de durabilidad relacionada con la disponibilidad (grado de operatividad) y la fiabilidad (ausencia de fallas), entonces cumple, en gran medida, los requisitos para la integridad del diseño de ingeniería. Al diseñar para la mantenibilidad, se debe considerar el tipo de mantenimiento y debe tener un papel influyente en la atención de la capacidad de servicio.

### ***2.5.2. DETERMINACIÓN DE LA MANTENIBILIDAD DE COMPONENTES (EQUIPOS) EN LA ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL***

La mantenibilidad puede considerarse como una medida del estado reparable de un equipo, el cual viene determinado por el tiempo medio de reparación MTTR<sup>5</sup>, y se establece mediante acciones de mantenimiento correctivo.

---

<sup>5</sup> MTTR proviene de las siglas en inglés Mean Time To Repair, cuya traducción al español es Tiempo Medio Para Reparar.

La teoría de la probabilidad y las estadísticas tienen un papel importante en el diseño de la mantenibilidad, se pueden utilizar varios tipos de distribuciones para cuantificar los datos del tiempo de reparación e incluso la incertidumbre de los tiempos de reparación. “Cuando no se dispone de datos de tiempo de reparación, incluidos los datos que representen tasas de error o el tiempo esperado para fallar, es necesario utilizar métodos cualitativos que impliquen teoría de posibilidades. Sin embargo, en el caso de que los datos estén disponibles, se podrán identificar las distribuciones de tiempo de reparación y obtener la función de mantenimiento correspondiente” (Stapelberg, 2009).

La función de mantenimiento se utiliza para predecir la probabilidad de que una reparación, a partir de tiempo  $t = 0$ , se llevará a cabo en un  $t$  de tiempo. La función de mantenimiento  $M(t)$ , para cualquier distribución, se expresa mediante la siguiente relación (Dhillon 1999b):

$$M(t) = \int_0^t f_r(t) dt \quad (2-20)$$

Dónde:

$f_r(t)$  = es la función de densidad de probabilidad del tiempo de mantenimiento (reparación).

Esta función, puede estar representada por varias funciones de distribución, dependiendo de las características estadísticas de los datos y de los parámetros de función. La distribución exponencial es especialmente útil para presentar tiempos de mantenimiento de duración aleatoria. La función de densidad de probabilidad de distribución exponencial se define mediante la siguiente relación:

$$f_r(t) = \left(\frac{1}{MTTR}\right) e^{-\left(\frac{t}{MTTR}\right)} \quad (2-21)$$

Dónde:

t = Es el tiempo de reparación variable [hr]

MTTR = Es el tiempo medio para reparar [hr]

Al sustituir la ecuación (2-20) en la ecuación (2-21), se obtiene la siguiente relación:

$$M(t) = \int_0^t \left(\frac{1}{MTTR}\right) e^{-\left(\frac{t}{MTTR}\right)} dt \quad (2-22)$$

Integrando la función se tiene:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{MTTR}\right)} \quad (2-23)$$

O lo que es lo mismo:

$$M(t) = 1 - e^{-(\mu t)} \quad (2-24)$$

El parámetro fundamental es la tasa de reparación,  $\mu$ , la recíproca de MTTR, en lugar de la tasa de fallas, la recíproca de MTBF. El tratamiento del "tiempo para un evento" también se invierte, en el sentido de que el objetivo debe ser hacer que  $\mu$  sea lo más alto posible, de modo que las reparaciones se completen rápidamente, y para que el tiempo entre fallos sea lo más alto posible.

## **2.6. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA Y COSTOS DEL CICLO DE VIDA**

El análisis financiero de la industria petrolera toma en cuenta principalmente a la inversión de bienes de capital (CapEx) y a los gastos operativos (OpEx) estos últimos pueden ser

potencialmente mayores comparados con la inversión en bienes de capital, esto se explica porque al calcular los costos de la actividad de una planta, se consideran los costos de mantenimiento y el suministro de las empresas de servicios públicos (energía, agua y gas, entre otros) y al calcularse estos gastos sobre la vida útil de la empresa cuya duración puede ser de 15 a 20 años aproximadamente, los gastos OpEx son, en general, una cifra mucho mayor comparada con CapEx. CapEx es normalmente una variable conocida: la inversión en la compra de equipos y la construcción de las instalaciones. Por lo tanto, el desafío es la estimación de los gastos OpEx, que son variables porque las fallas ocurren inesperadamente, esto puede hacerse a través del análisis del ciclo de vida del proyecto.

“El análisis del ciclo de vida de una instalación de ingeniería, particularmente durante su desarrollo inicial, puede desempeñar un papel crucial en la determinación del costo general del ciclo de vida y la vida útil de la instalación, incluido el concepto de vida residual” (Stapelberg, 2009, pág. 314).

“Según la norma española UNE-EN 60300-3-3, el análisis de costo de ciclo de vida es el proceso de análisis económico que valora el costo total de adquisición, propiedad y eliminación de un producto.” (Fuenmayor, 2019)

Este tipo de análisis busca medir cualitativa y cuantitativamente el rendimiento tanto en las etapas del ciclo de vida del sistema como/o del equipo, así como a lo largo del ciclo de vida total de la instalación de ingeniería, desde el diseño hasta el posible salvamento.

Los costos del ciclo de vida (CCV) son costos totales desde el inicio hasta la finalización tanto para equipos como para proyectos. El objetivo del análisis CCV es elegir el enfoque más rentable de una serie de alternativas para que se logre el menor costo de propiedad a

largo plazo. Las estimaciones analíticas de los costos totales son algunos de los métodos para los costos del ciclo de vida.

Tabla 2-3: Costos del ciclo de vida de un proyecto de ingeniería

COSTOS DE ADQUISICIÓN	COSTOS DE MANTENIMIENTO
Inversión de capital y gestión financiera.	Gestión, consulta y supervisión.
Investigación y desarrollo, diseño de ingeniería y pruebas piloto.	Ingeniería y documentación técnica.
Permisos, arrendamientos y honorarios legales, indemnización y costos legales.	Materiales de operaciones y consumo.
Fichas y especificaciones de ingeniería y datos técnicos.	Uso de instalaciones y consumo de energía.
Fabricación/construcción, fabricación e instalación.	Consumibles de mantenimiento y mantenimiento.
Rampa y garantía, modificaciones y mejoras.	Sustitución y renovación de equipos.
Instalaciones de apoyo y servicios públicos y equipos de apoyo.	Mantenimiento programado y no programado.
Logística de capacitación y mantenimiento de operaciones.	Soporte logístico y repuestos de suministro.
Sistemas de gestión y control informático.	Trabajo, materiales y gastos generales.

Fuente: Elaborado en base a Hanbook of Reliability, Availability, Mantainability and Safety in Engineering in Design, Stapelberg, 2009

El costo del ciclo de vida está fuertemente influenciado por el diseño del equipo, las prácticas de instalación/uso y las prácticas de mantenimiento, es por esto es que el análisis CCV en diseño de ingeniería ayuda a los diseñadores a justificar la selección de equipos y

procesos en función de los costos totales, en lugar de los costos estimados de adquisición que son utilizados ampliamente como criterios primarios (y a veces sólo) porque son criterios relativamente simples, aunque a menudo resultan en datos financieros insuficientes para una toma de decisiones adecuada. Complementarias a las posiciones de costos de adquisición y mantenimiento enumeradas anteriormente, algunas posiciones de costo típicas del ciclo de vida que deben identificarse durante el proceso de diseño de ingeniería son las siguientes:

Tabla 2-4: Costos durante las etapas del ciclo de vida de los activos

ETAPAS DEL CICLO DE VIDA	CATEGORÍA DE COSTOS
Factibilidad/ Conceptualización Diseño Preliminar y de Detalle	Costos de Especificación
Construcción /Fabricación Obtención/ Instalación Puesta en servicio/ Garantía	Costos de Establecimiento
Operación/ Utilización Mantenimiento/ Modificación Renovación/ Rehabilitación	Costos de Utilización
Desmantelamiento Desinstalación/ Desmantelamiento/ Demolición	Costos de Recuperación

Fuente: Traducido de Hanbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering in Design, Stapelberg, 2009

Los costos del ciclo de vida consisten fundamentalmente en la adquisición y el mantenimiento de costos, que no son mutuamente excluyente, todos estos costos se determinan evaluando los costos del ciclo de vida y realizando análisis de sensibilidad

para identificar a los factores de costos relativos. Se puede estimar el costo del equipo de mantenimiento como 2 a 20 veces el costo de adquisición del equipo a lo largo de su vida útil. Como se dijo anteriormente, el primer costo obvio de adquisición de bienes de capital suele ser la cantidad más pequeña que se gastará durante la vida útil de la adquisición, mientras que la mayoría de los gastos de mantenimiento no son obvios.

La mayoría de las estimaciones de equipos de capital ignoran partes importantes de los costos de mantenimiento, ya que carecen de cuantificación suficiente para justificar su inclusión. Incluso cuando se incluyen disposiciones para los costos de falla, aparecen como un porcentaje de los costos iniciales, y se distribuyen uniformemente como pérdida económica debido a los cierres a lo largo de la vida típica de la instalación diseñada. Sin embargo, para los modos de error de desgaste, el análisis se censura al no incluir errores en el intervalo de tiempo adecuado.

Por otra parte, el modelo de los costos de ciclo de vida de los activos, que representa las categorías de costos previamente definidas para la instalación de ingeniería en su ciclo de vida total se puede formular como:

$$CCV = C_E + C_{ES} + C_U + C_R \quad (2-25)$$

Dónde:

$C_E$  = Costos de especificación [\$]

$C_{ES}$  = Costos de establecimiento [\$]

$C_U$  = Costos de utilización [\$]

$C_R$  = Costos de recuperación [\$]

Sin embargo, se debe tener en cuenta que algunos de los costos incurridos en la vida del activo son difíciles de visualizar en la fase de diseño, por ejemplo, los costos de producción y construcción del activo. “En la fase de diseño, estos costos, no son relevantes para el diseñador, lo cual no significa que la organización deba obviar este tipo de costos, ya que más adelante, estos costos deberán ser considerados por las personas encargadas de producir y manufacturar el activo” (Fabrycky and Blanchard, 1991 y Ahmed, 1995).

### **2.6.1. COSTOS DE ESPECIFICACIÓN**

Estos costos están relacionados con las fases diseño de un sistema, “es importante mencionar que los resultados obtenidos en un proceso de análisis de costos alcanzan su máxima efectividad, justamente durante el desarrollo inicial, y una vez que se ha completado el diseño resulta difícil modificar sustancialmente los resultados económicos” (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2019). Se estima que casi dos tercios del coste del ciclo de vida de un activo o sistema se ven ya determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar (65-85 % de oportunidades de creación de valor y reducción de costos).

### **2.6.2. COSTOS DE ESTABLECIMIENTO**

Estos costos están asociados con el establecimiento del sitio, las obras del sitio, la construcción general, las estructuras de apoyo, la fabricación in situ, la inspección, el alojamiento del campamento, el desorden húmedo, el transporte, los edificios de oficinas, el alojamiento permanente, el suministro de agua, las instalaciones del taller, los accesorios especiales, las tiendas, los costos resultantes de la instalación de instalaciones auxiliares para el suministro y almacenamiento de servicios de apoyo, los costos asociados con la fabricación de sistemas y ensamblajes, la creación de instalaciones de fabricación

especializadas, los costos de fabricación, las inspecciones de calidad, el transporte, el almacenamiento y la manipulación.

### **2.6.3. COSTOS DE UTILIZACIÓN**

“Los costos en esta etapa están asociados a costes de: operación, energía, insumos y materia prima, mantenimiento preventivo y correctivo, overhaul, diseño y modificaciones de ingeniería, logística de repuestos, adiestramiento y cualquier otro coste que se genere a lo largo de ciclo de vida del activo” (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2019). Estos costos son los más significativos del ciclo de vida de un activo y adicionalmente, son los más difíciles de predecir; se estima que podrían llegar a exceder hasta 10 veces más los costes iniciales de adquisición.

### **2.6.4. COSTOS DE RECUPERACIÓN**

Son los costos asociados con el desmantelamiento de instalaciones de ingeniería, incluidos todos los pagos debidos a la terminación de las operaciones, como el desmantelamiento y eliminación de equipos, la protección del medio ambiente, además de los costos asociados con la restauración de un sitio a su condición original.

### **2.6.5. COSTO ACTUAL NETO Y COSTO ANUAL EQUIVALENTE**

El Costo Actual Neto se define como “la sumatoria de los costos anuales actualizados al presente, que interfieren en el ciclo de vida de un activo” (Casilla, 2021)

.Matemáticamente se expresa como:

$$CAN = A + \sum_{i=1}^t C_{OPEX} \times r^t - R \times r^t \quad (2-26)$$

Además:

$$r = \frac{1}{1+i} \quad (2-27)$$

Dónde:

$CAN$  = Costo actual neto [\$]

$A$  = Costo de adquisición [\$]

$R$  = Valor de reventa [\$]

$r$  = Tasa de interés de retorno

$i$  = Tasa de descuento

$t$  = Periodo [años]

$C_{Opex}$  = Costos OPEX

Por otro lado, el Costo Anual Equivalente “consiste en convertir los costos de un proyecto a una serie uniforme equivalente para un periodo de tiempo determinado, de manera que se puedan comparar las alternativas en ese periodo.” (Fuenmayor, 2019) En otras palabras, sirve para anualizar los costos actuales netos.

$$CAE = CAN \times FRC \quad (2-28)$$

Dónde:

$CAE$  = Costo actual equivalente [\$]

$FRC$  = Factor de recuperación de capital

$$FRC = \frac{i \times (1+i)^t}{(1+i)^n - 1} \quad (2-29)$$

## **CAPÍTULO 3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO**

### **3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO**

La principal función de una planta de tratamiento de gas natural (planta tipo Dew Point) es la de adecuar el gas natural a las condiciones de venta establecidas por la norma o por contrato. Otra función es la de proteger la tubería y equipos que son utilizados para transportar al gas, además, es por eso que está ubicada en cercanías a los pozos productores. Por último, en la planta se separan los componentes más pesados del gas natural (C3+), con el fin de disminuir el punto de rocío del gas y si es posible, comercializar los líquidos como gasolina. En términos generales, la planta estará compuesta de los siguientes sistemas:

- Sistema colector de planta
- Sistema de separación primaria
- Sistema de endulzamiento
- Sistema de ajuste de punto de rocío
- Sistema de compresión de gas
- Sistema de almacenamiento y bombeo de condensado
- Sistemas de servicios (gas combustible, diésel oíl, eléctrico general, sistema de protección catódica, instrumentación, sistema contra incendios, tratamiento sanitario, etc.) En Bolivia, las características de salida del gas, según norma y según contratos compra-venta con Brasil, y Argentina, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3-1 : Condiciones de Gas de Venta

CONDICIONES DE GAS DE VENTA			
Propiedad	Especificaciones dentro del territorio nacional	Especificaciones Contrato con Brasil	Especificaciones Contrato con Argentina
Poder calorífico	> 970 [BTU/ft3]	1034 [BTU/ft3]	1045 [BTU/ft3]
Densidad relativa al aire	> 0,58 y < 0,69	> 0,59 y < 0,69	> 0,59 y < 0,69
Volumen de Nitrógeno máx.	2 [%Vol.]	2 [%Vol.]	2 [%Vol.]
Volumen de Gases Inertes, incluyendo CO2 máx.	3,5 [%Vol.]	3,5 [%Vol.]	3,5 [%Vol.]
Vapor de agua máx.	95 [mg/m3]	95 [mg/m3]	65 [mg/m3]
Sulfuro de Hidrógeno máx.	5 [mg/m3]	5 [mg/m3]	5 [mg/m3]
Sulfuro de Mercaptano máx.	15 [mg/m3]	15 [mg/m3]	15 [mg/m3]
Azufre total máx.	50 [mg/m3]	50 [mg/m3]	50 [mg/m3]
Oxígeno máx.	0,2 [%Vol.]	0,2 [%Vol.]	0,2 [%Vol.]
Dióxido de Carbono [%Vol.]	2 [%Vol.]	2 [%Vol.]	2 [%Vol.]
Punto de Rocío [°C]	0 [°C] a Pman=45 kg/cm2	< 0 [°C] a Pman=45 kg/cm2	< 7,2 [°C] a Pman=45 kg/cm2
Mercurio máx.	-	0,6 [µg Hg/m3]	0,9 [µg Hg/m3]
Impurezas	Libre de agua en forma líquida, polvo o cualquier otra materia sólida o líquida, ceras, adherentes y/o cualquier otra substancia que interfiera con o perjudique la comercialidad del gas. Sustancialmente libre de hidrocarburos aromáticos, glocoles, metanol o cualquier otra sustancia utilizada en el procesamiento del gas. No contener condensados o hidrocarburos en forma líquida.	Debe estar exento de hidrocarburos aromáticos, glicoles, metanol o cualquier otra sustancia utilizada en el procedimiento del gas natural.	Debe estar exento de hidrocarburos aromáticos, glicoles, metanol o cualquier otra sustancia utilizada en el procedimiento del gas natural.

Fuente: Elaboración propia con información obtenida del Anexo 4 : Calidad del Gas Natural, Agencia Nacional de Hidrocarburos, y Contratos de

Compra-Venta de Gas Bolivia-Brasil y Bolivia-Argentina

### **3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AJUSTE DE PUNTO DE ROCÍO**

Como se mencionó anteriormente, uno de los grandes sistemas de la planta de tratamiento de gas natural, es el sistema de ajuste de punto de rocío. Como su nombre lo indica, este sistema se encarga de adecuar el punto de rocío del gas natural que, por contener fracciones importantes de hidrocarburos, es alto lo cual ocasiona la condensación de los líquidos del gas natural en la tubería que lo transporta, obstruyéndola y dificultando el flujo del gas; además, cuando el gas natural es rico en fracciones de C3+, la recuperación de estas es generalmente beneficiosa, pues se las adecúa como gasolina. Por otro lado, ya que el agua siempre está presente en el gas natural, este sistema también debe removerlo y así prevenir la formación de hidratos en tuberías o equipos.

El tipo de sistema de ajuste de punto de rocío y recuperación de LGN, puede ser implementado de acuerdo a la cantidad de C3+ que desea extraerse, de acuerdo a la presión de entrada del gas a planta, y de acuerdo a la composición misma del gas natural, por lo tanto, existen varias opciones, las más comunes son:

- Uso de válvulas Joule- Thompson: Cuando la presión de entrada en alta y se desea recuperar principalmente C2+. Aunque es menos eficiente que el turbo expansor, puede trabajar con menos caudal y su diseño y operación es sencilla.
- Uso de turboexpansores: Cuando la presión de entrada en alta y se desea recuperar principalmente C2+, también sirve para optimizar la recuperación de C3+, pero no es tan eficiente cuando se trabaja con grandes caudales de gas.
- Uso de refrigeración externa con propano: Cuando la presión de entrada en baja y se desea recuperar principalmente C3+

Debido a que el gas boliviano cuenta con gas rico y una demanda interna de gasolina, el sistema más utilizado es el de refrigeración externa con propano, entonces, podemos subdividir al sistema de adecuación del punto de rocío en:

- Sistema remoción de agua
- Sistema de ajuste de punto de rocío
- Sistema de refrigeración externa con propano
- Sistema de estabilización del condensado

### **3.1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO**

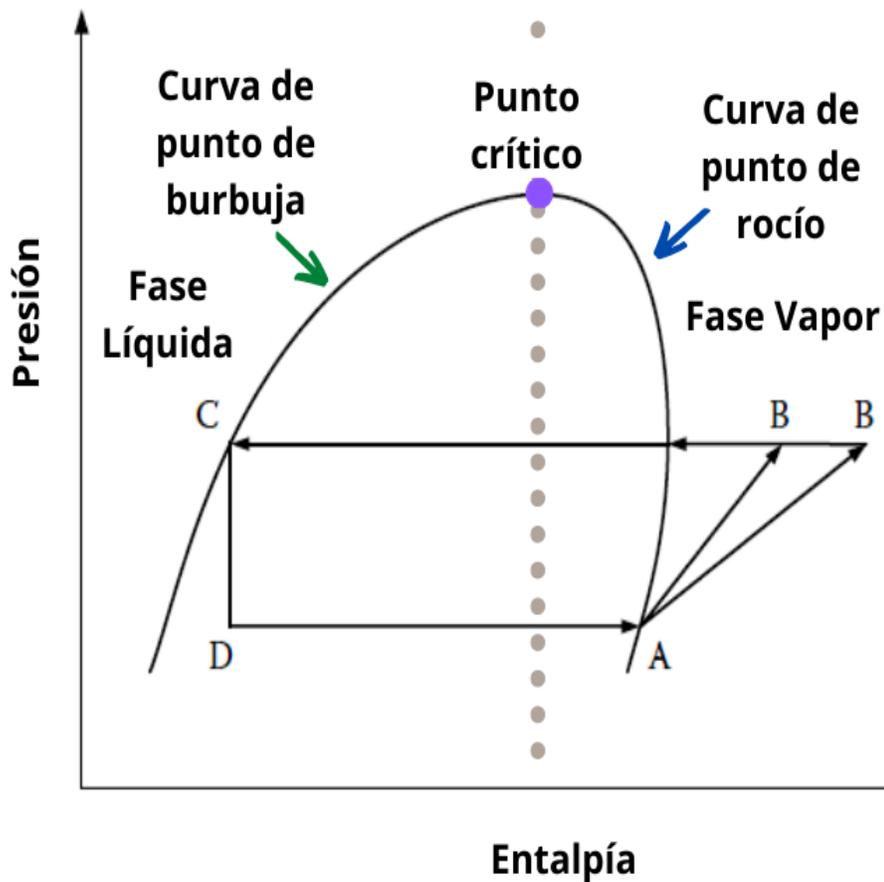
El sistema de refrigeración externo es el encargado de enfriar al propano que, a su vez, enfría el gas que pasa por el chiller del sistema de ajuste del punto de rocío, ya que este absorbe calor en el proceso. El proceso básico del sistema de refrigeración con propano consiste en cuatro etapas (Figura 3-1) que se llevan a cabo cuando el propano pasa por los seis puntos del circuito (Figura 3-2):

- a) Compresión.** – Como se observa en la Figura 3-1, la presión del propano se eleva desde una presión  $P_A$  hasta una presión  $P_B$ , mayor a su presión de vapor, con ayuda de los compresores del sistema (paso 6 a 5 de la Figura 3-2).
- b) Condensación.** – Cuando el propano pasa del punto B al C, disminuye su temperatura y se condensa, esto ocurre al pasar por el condensador.
- c) Expansión.** – Luego, el propano líquido pasa del condensador al acumulador (punto inicial del sistema). Después este atraviesa una válvula Joule – Thompson, donde se descomprime abruptamente (paso del punto C al punto D), reduciendo su temperatura

aún más, lo suficientemente bajo como para remover C3+ de la corriente de gas natural.

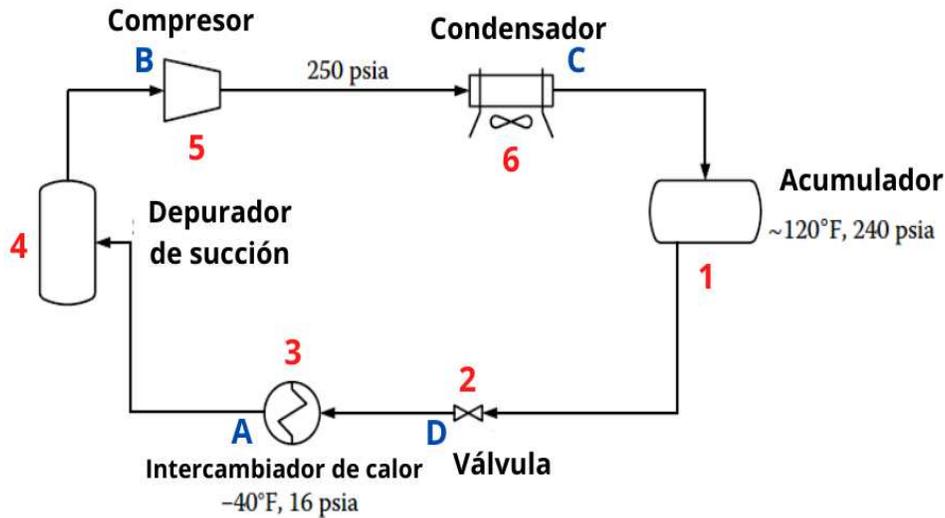
- d) **Evaporación.** - Finalmente, la temperatura del propano aumentará al pasar por un intercambiador de calor, cuyo fin es enfriar el gas natural. Se pasa así del punto D al A, logrando que el propano se evapore, este pasa luego a un depurador que separe la parte gaseosa de la parte líquida. Completándose así el ciclo de refrigeración y el circuito del sistema, logrando al mismo tiempo la recuperación o remoción de los líquidos del gas natural.

Figura 3-1: Diagrama Presión vs Entalpía para la refrigeración mecánica



Fuente: Adaptado y traducido de Fundamentals of Natural Gas Processing, Kidnay, A. J., Parrish, , D. G., 2006

Figura 3-2: Sistema de refrigeración con propano de una sola etapa



Fuente: Adaptado y traducido de Fundamentals of Natural Gas Processing, Kidnay, A. J., Parrish, , D. G., 2006

### 3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO

#### 3.2.1. TANQUE ACUMULADOR DE PROPANO

El tanque acumulador de propano tiene las siguientes características:

- Es el equipo donde se almacena el propano en fase líquida proveniente del enfriador.
- Tiene una presión de diseño acorde con la presión de diseño del compresor.
- Tanto el nivel del líquido como la presión son monitoreados localmente.
- EL propano líquido acumulado temporalmente va hacia la válvula J-T.

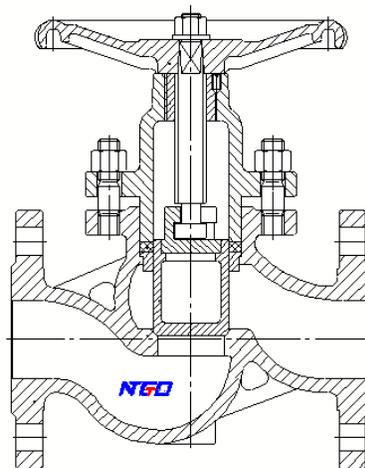
#### 3.2.2. VÁLVULA J-T

Este equipo recibe el nombre de válvula Joule-Thompson debido al fenómeno físico (efecto Joule-Thompson) que se produce cuando un líquido pasa por ella. Este fenómeno

consiste en el “... cambio de temperatura observado cuando un gas se expande mientras fluye a través de una restricción sin que ningún calor entre en el sistema ni salga de él.” (Schlumberger, s.f.); por lo que se trata de una expansión isoentálpica la cual hace que al bajar la presión haya también una disminución de la temperatura. Se puede decir entonces, que la válvula J-T sirve para enfriar el propano, proveniente del acumulador, que posteriormente ingresará al chiller para enfriar el flujo de gas natural.

De todos los tipos de válvulas existentes, la válvula globo es la que mayor caída de presión presenta y permite regular la presión del fluido, por lo que es la más adecuada para este tipo de proceso.

Figura 3-3: Válvula tipo globo



Fuente: <https://www.ntgdvalve.com/es/globe-valve/>

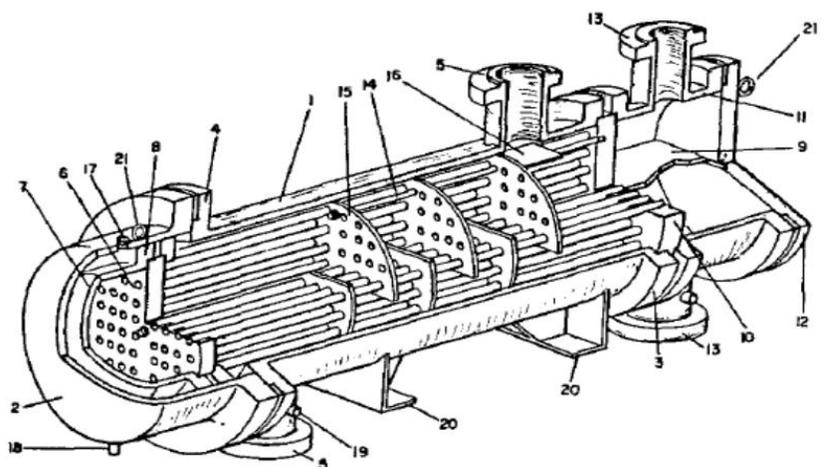
Las válvulas globo, disponen de un tapón que funciona como obturador que se mueve de manera lineal hacia dentro y fuera de una superficie de asiento por medio de un vástago; éste es puesto en acción a través de una manivela o volante. Puede estar fabricado con acero inoxidable, acero al carbono y/o demás materiales anticorrosivos.

### 3.2.3. CHILLER

El chiller es un intercambiador de calor con tubos en U donde el refrigerante fluye por el lado de carcasa y el gas o carga al chiller ingresa por los tubos. El propano que viene el economizador de la válvula ingresa al chiller y, dentro de este, se va evaporando gracias a que absorbe el calor desprendido del gas natural; mientras que, el gas natural se enfría hasta su punto de burbuja. En la planta Dew Point Margarita el gas natural ingresa al chiller con una temperatura de 22,7°C y sale a 3.5 °C y trabaja a una presión de aproximadamente 30 psig. (Roca Álves, 2016)

El principio de funcionamiento de los chiller es el de intercambio de calor por convección, ya que tanto el propano como el gas natural se encuentran en constante movimiento y están separados por las paredes de los tubos.

Figura 3-4: Partes del intercambiador de carcasa y tubos

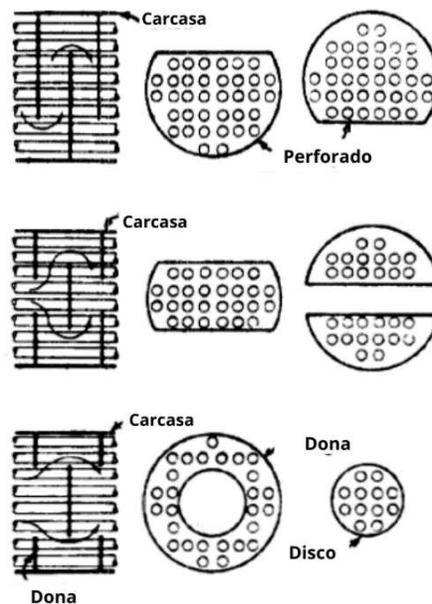


- |                                   |                                 |                               |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1. Carcasa                        | 8. Brida de cabeza flotante     | 15. Deflectores transversales |
| 2. Cobertura de la carcasa        | 9. Partición de canal           | 16. Deflectores de impacto    |
| 3. Canal de la carcasa            | 10. Placa de tubos estacionaria | 17. Conexión de ventilación   |
| 4. cubierta de la carcasa y brida | 11. Canal                       | 18. Conexión de drenaje       |
| 5. Boquilla de la carcasa         | 12. Cubierta del canal          | 19. Conectores de prueba      |
| 6. Placas de tubos flotantes      | 13. Boquilla del canal          | 20. Soportes                  |
| 7. Cabeza flotante                | 14. Barillas y espaciadores     | 21. Anillo de carga           |

Fuente: Traducido de Chemical Process Equipment: Design and Selection, Walas, 1990, pág. 200

Los intercambiadores de carcasa y tubos son los intercambiadores más ampliamente utilizados en la industria y con las consideraciones de diseño mejor definidas. “Dichos intercambiadores están formados por una serie de tubos en paralelo y en serie a través de los cuales viaja un fluido, y están encerrados en una carcasa a través de la cual se lleva a cabo el otro fluido.” (Walas, 1990) Los tubos pueden ser completos o soldados y generalmente están hechos de cobre o aleaciones de acero, tras aleaciones de níquel, titanio o aluminio pueden ser requeridas para aplicaciones específicas. La carcasa, por otro lado, es fabricado con acero inoxidable o acero al carbono, u otras aleaciones anticorrosivas.

Figura 3-5: Tipos de deflectores del chiller

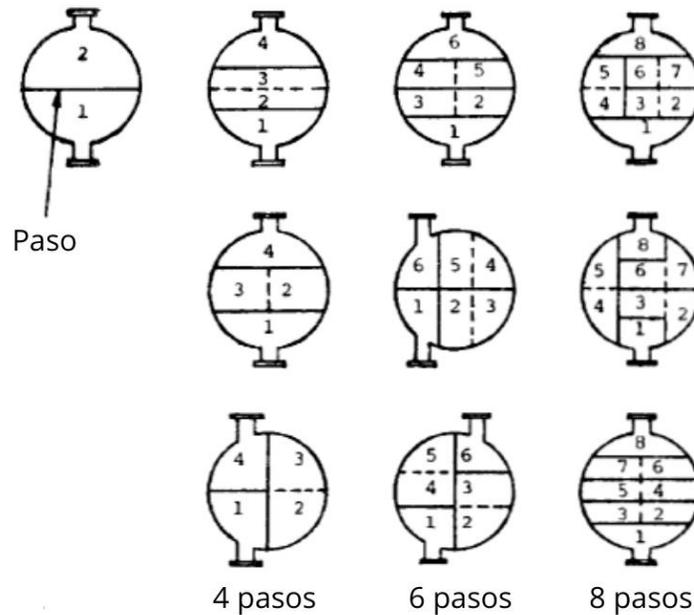


Fuente: Traducido de Chemical Process Equipment: Design and Selection, Walas, 1990, pág. 201

El lado de la carcasa está provisto de una serie de deflectores para promover altas velocidades y un flujo cruzado en el exterior de los tubos. El paso deflector, o distancia entre deflectores, normalmente es de 0.2-1.0 veces el diámetro interior de la carcasa. Además, los intercambiadores se construyen, principalmente, con un número par de pasos

de tubo, cada una de las cuales reduce el número de tubos que se pueden acomodar en una carcasa de un tamaño determinado.

Figura 3-6: Arreglos de pasos para los intercambiadores de calor



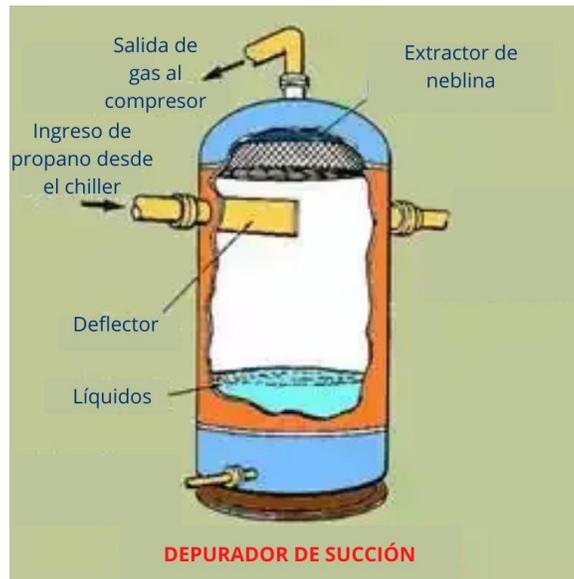
Fuente: Traducido de Chemical Process Equipment: Design and Selection, Walas, 1990, pág. 201

### 3.2.4. *DEPURADOR DE SUCCIÓN*

El depurador de succión o Scrubber, evita que el propano en fase líquida pueda entrar al compresor y, por ende, pueda dañarlo. El depurador retiene el propano líquido y a través de un calentador que lleva internamente, brinda calor de tal forma que el propano líquido se evapora en su totalidad. Bajo la operación normal, no debería haber líquido en este dispositivo ya que el propano se encuentra en su punto de rocío, la presencia de líquido es una indicación de condiciones anormales.

En la planta Dew Point Margarita, “el depurador de succión del compresor refrigerante es un separador vertical, con una presión del diseño de 250 psig”.

Figura 3-7: Depurador de succión



Fuente: Adaptado y traducido de <https://www.virdapark.my.id/2021/10/vapor-recovery-unit-principles.html>

### 3.2.5. COMPRESOR

Los compresores juegan un papel importante en el sistema de refrigeración con propano ya que, en la etapa de compresión ya que, para facilitar la condensación del propano, es necesario primero elevar su presión hasta el punto inicial del circuito. “Las dos grandes categorías de compresores son de desplazamiento positivo y dinámicos” (Kidnay & Parrish, 2006), y son impulsados por turbinas de combustión de vapor o gas, motores eléctricos o motores de combustión interna que funcionan con gas combustible. El compresor utilizado en la planta Dew Point Margarita “es un compresor rotativo de tornillo con una potencia de 450 HP accionado por un motor eléctrico e incrementa la presión del propano de 30 a 210 psig” (Roca Álves, 2016).

“Los compresores de gas y refrigeración suelen ser el mayor gasto de capital en la construcción de una nueva planta de procesamiento de gas. Representan hasta el 50 al

60% del costo total instalado de la instalación. También tienden a tener el mayor gasto de mantenimiento en la instalación.” (Kidnay & Parrish, 2006)

- Los compresores reciprocantes son los más usados en la industria de gas y petróleo, y esto se debe a que no dependen de la composición del fluido a comprimir. “Estas bombas llenan en la carrera trasera y se agotan en la carrera delantera. Están disponibles con émbolos simples (simplex) o multiémbolos (dúplex, triplex, etc.), que funcionan horizontal o verticalmente” (Munday & Farrar, 1979). Otra de sus ventajas es que tienen presiones de descarga suficientemente altas para cumplir con los requisitos de procesamiento y transmisión de gas. Por otro lado, “los compresores reciprocantes tienen una serie de inconvenientes; el principal es la confiabilidad. Su tiempo de ejecución es del 90 al 95% en comparación con aproximadamente el 99% para otros tipos de compresores”. (Jandjel, 2000).

Figura 3-8: Compresor reciprocante



Fuente: [https://mayekawa.com/americas/mm/mycom/reciprocating\\_compressors/index.html](https://mayekawa.com/americas/mm/mycom/reciprocating_compressors/index.html)

- “Los compresores de tornillo rotativo utilizan dos tornillos, o lóbulos para comprimir el gas. El gas entra a medida que las roscas en el lado de succión se separan, y se mueve por las roscas a medida que los tornillos giran, el gas sale en un puerto axial al

final de los tornillos. Una unidad de temporización mantiene los dos lóbulos sincronizados” (Kidnay & Parrish, 2006). Los tornillos funcionan a 3.000 a 8.000 rpm, y la velocidad se varía fácilmente para proporcionar un medio eficiente para manejar caudales más bajos. A diferencia de los compresores alternativos, esencialmente todo el gas se desplaza, por lo que su eficiencia volumétrica es del 100%. Sin embargo, la principal limitación de los compresores de tornillo exentos de aceite es la baja presión de descarga.

Figura 3-9: Compresor de tornillo



Fuente: <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog/compresor-de-tornillo-como-funciona>

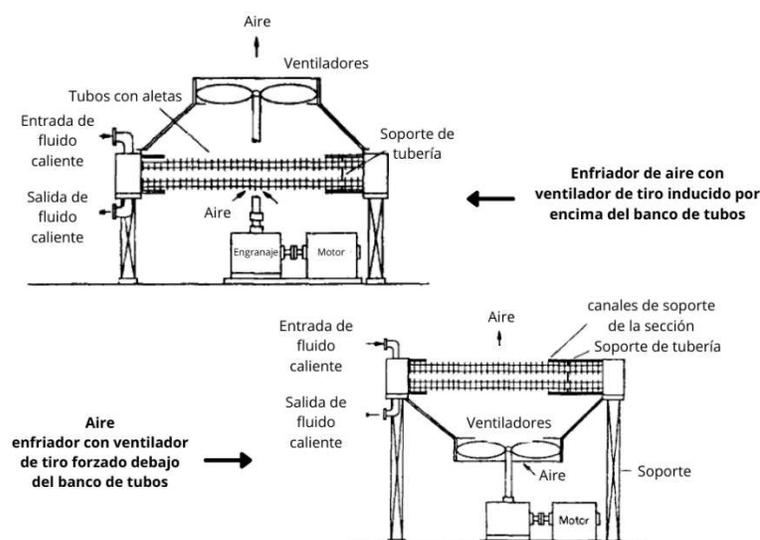
### 3.2.6. CONDENSADOR

Para la fase de condensación del propano, las plantas Dew Point, generalmente utilizan aerofriadores. especialmente en aquellos lugares con difícil acceso a agua o donde el proceso pudiera requerir enormes cantidades del mismo. “La economía de la aplicación de los enfriadores de aire favorece los servicios que permiten una diferencia de temperatura de 25-50 ° F entre el aire ambiente y la salida del proceso.” (Walas, 1990)

Los aroenfriadores, no son más que otro tipo de intercambiador de calor. “En tales equipos, el fluido de proceso fluye a través de tubos con aletas y el aire de enfriamiento se sopla a través de ellos con ventiladores.” (Walas, 1990)

Según el informe operacional de la Planta Dewpoint Margarita (Roca Álvez, 2016), la temperatura del refrigerante a la entrada del condensador es de aproximadamente 140 °F y a la salida es de aproximadamente 90 °F.

Figura 3-10: Tipos de aroenfriadores



Fuente: Traducido de Chemical Process Equipment: Design and Selection, Walas, 1990, pág. 175

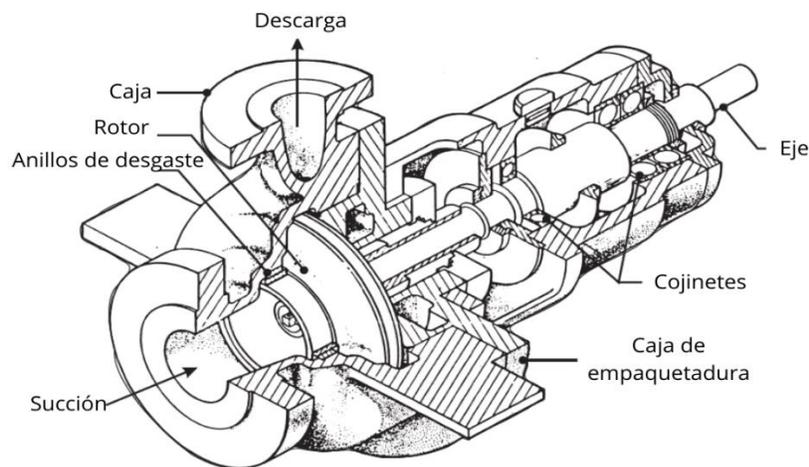
La Figura 3-10 muestra los tipos de aroenfriadores, la disposición de tiro forzado, desde debajo de los tubos, desarrolla una alta turbulencia y, en consecuencia, altos coeficientes de transferencia de calor. Las velocidades de escape, sin embargo, son bajas, 3 m/seg más o menos, y como resultado puede ocurrir una mala distribución, mezcla de retroceso y sensibilidad a las corrientes cruzadas. Con el tiro inducido desde arriba de los tubos, las velocidades de escape pueden ser del orden de 10 m/seg, por lo que hay mejores resultados

de distribución de flujo. Este tipo de instalación es más costosa, las caídas de presión son más altas y el equipo está bañado en aire caliente que puede ser deteriorante. El montaje menos sólido también puede resultar en una operación más ruidosa.

### 3.2.7. BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las bombas son equipos relevantes en cualquier proceso que involucre circulación de fluidos, y en este caso no es la excepción. Aunque podrían considerarse equipos secundarios, es necesario conocer su importancia en el proceso.

Figura 3-11: Partes de una bomba centrífuga



Fuente: Traducido de Engineering Data Book, Munday & Farrar, 1979

Las bombas centrífugas son de las más utilizadas en la industria, éstas “aumentan la presión del fluido bombeado por acción de la fuerza centrífuga sobre el fluido” (Munday & Farrar, 1979). El fluido entra por el centro del rodete o impulsor,1 que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa (voluta) o cuerpo de la bomba. Debido a la geometría del cuerpo, el fluido es conducido hacia las tuberías de salida o hacia el

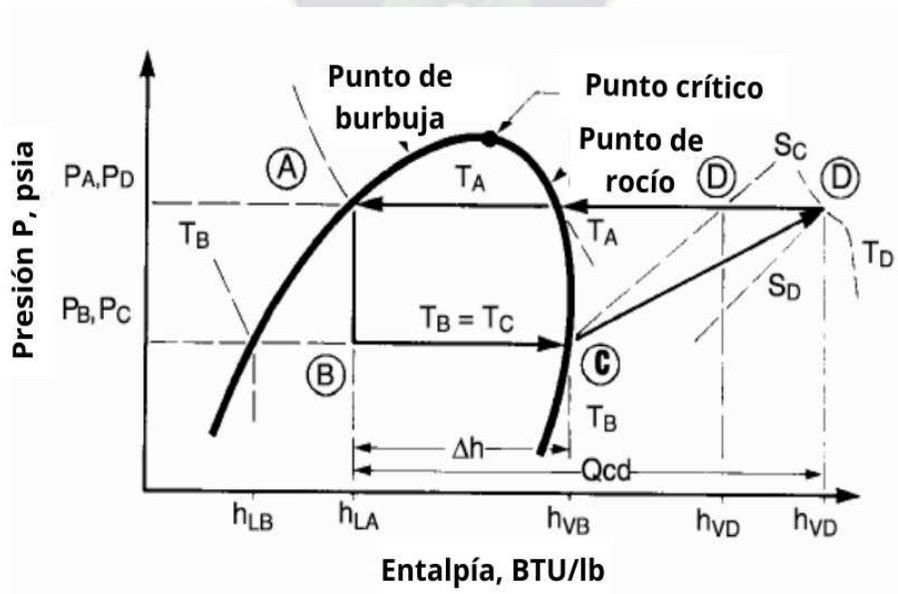
siguiente impulsor. Las bombas están capacitadas para vencer la presión que el fluido encuentra en la descarga impuesta por el circuito.

La mayoría de las bombas utilizadas en el servicio de procesamiento de gas son accionadas por motores eléctricos, generalmente motores de inducción de velocidad fija. Las bombas fabricadas con cajas de acero fundido e interiores de hierro fundido son las más comunes en la industria de procesamiento de gas. API STD 610 es una buena referencia para la selección de materiales. “La experiencia es la mejor guía para la selección de materiales para bombas. Los fabricantes de bombas de proceso generalmente pueden proporcionar sugerencias de materiales, basadas en su experiencia y conocimiento de las bombas” (Munday & Farrar, 1979).

### 3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO

La siguiente figura muestra en detalle el ciclo de refrigeración:

Figura 3-12: Diagrama Presión vs Entalpía detallado



Fuente: Traducido de Engineering Data Book, Gas Processors Suppliers Association, 2004, pág 14-2

En base a la Figura 3-12, el diseño de un sistema básico de refrigeración, es realizado con las siguientes ecuaciones matemáticas.

- **Etapas de expansión**

$$X = \frac{h_{VB} - h_{LA}}{h_{VB} - h_{LB}} \quad (3-1)$$

Dónde:

X = fracción de propano líquido formado durante la expansión

$h_{VB}$  = Entalpía del punto de saturación del vapor del propano a la temperatura B [BTU/lb]

$h_{LB}$  = Entalpía del líquido saturado a la temperatura B [BTU/lb]

$h_{LA}$  = Entalpía del líquido saturado a la temperatura A [BTU/lb]

- **Etapas de evaporación**

$$Efecto_R = h_{VB} - h_{LA} \quad (3-2)$$

Dónde:

$Efecto_R$  = Efecto refrigerante del propano

$$Q_{Refrigeración} = m(h_{VB} - h_{LA}) \quad (3-3)$$

Dónde:

$Q_{Refrigeración}$  = Capacidad (Duty) de refrigeración del sistema, que es la cantidad total de calor absorbido por el propano en el chiller [BTU/hr]

$m$  = Tasa de circulación del propano [lb/hr]

- **Etapa de compresión**

$$W = \frac{W_{ideal}}{\eta_i} = \frac{m(h'_{VD} - h_{VB})}{\eta_i} \quad (3-4)$$

Dónde:

$W_{ideal}$  = Trabajo ideal realizado por el compresor [BTU/hr]

$\eta_i$  = Eficiencia isoentrópica del compresor

$h'_{VB}$  = Entalpía del punto de saturación del vapor en el punto D' ( ideal) [BTU/lb]

$$h_{VD} = \frac{(h'_{VD} - h_{VB})}{\eta_i} + h_{VB} \quad (3-5)$$

Dónde:

$h_{VB}$  = Entalpía del punto de saturación del vapor en el punto D (no ideal) [BTU/lb]

- **Etapa de condensación**

$$Q_{dc} = m(h_{VD} - h_{LA}) \quad (3-6)$$

Dónde:

$Q_{dc}$  = Capacidad (Duty) del condensador, que es el calor retirado del propano para ser condensado [BTU/hr]

## **CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO METODOLÓGICO**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Este capítulo muestra el desarrollo de un modelo metodológico para la realización de un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) en la etapa de diseño conceptual, planteado en el objetivo principal del proyecto.

Al realizar un análisis RAM, las consideraciones básicas que se deben tomar en cuenta son tres:

- El sistema bajo estudio
- Los datos
- Los resultados

Es entonces, en base a estos tres puntos, que se elabora la siguiente propuesta metodológica, cuyo objetivo principal es realizar una comparación entre las posibles configuraciones de diseño para cualquier proyecto que requiera ser analizado en la industria de gas y petróleo.

### **4.2. FASE 1: EL SISTEMA BAJO ESTUDIO**

#### **4.2.1. ESTUDIO Y DISEÑO PREVIO DEL SISTEMA**

El primer paso para realizar el análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, es realizar, primeramente, un estudio con el fin de conocer los procesos y equipos involucrados y, posteriormente, un diseño básico del sistema bajo estudio.

#### **4.2.2. DELIMITACIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO**

La delimitación del sistema sobre el cual se quiere realizar un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad es importante teniendo en cuenta que no es conveniente

abarcar un sistema demasiado grande o complejo porque encarece y dificulta la recolección y procesamiento de datos. Debido a esto, se sugiere hacer una categorización y una subdivisión del sistema, tomando en cuenta la norma ISO 14224, la cual presenta una clasificación taxonómica de la industria hidrocarburífera en general (Figura 4-1).

Figura 4-1: Clasificación taxonómica con niveles taxonómicos



Fuente: Traducido y adaptado de ISO 14224, 2016

En base a esto y tomando en cuenta que la fase de diseño en la que se encuentra el proyecto (ingeniería conceptual), el alcance recomendado de la subdivisión llega hasta el punto 6 de la pirámide, que corresponde a la unidad de equipo ya que el objetivo principal del análisis es la comparación económica y de eficiencia, entre distintas configuraciones del sistema y no un análisis más detallado a nivel de los componentes de cada equipo.

#### **4.2.3. DATOS ESPECÍFICOS PARA CADA EQUIPO**

Una vez realizada una categorización general, se procederá a clasificar a los equipos por sus parámetros técnicos y operacionales con el fin de identificar al equipo y analizarlo de mejor manera, ya que cada caso de estudio es diferente. Algunos de los datos mínimos que la norma ISO-14224 requiere son:

- Clase de equipo (Bomba, compresor, intercambiador de calor, etc.)
- Tipo de equipo (Centrífugo, carcasa y tubos, etc.)
- Identificación o codificación del equipo
- Nombre del fabricante
- Modo o estado operativo normal (Funcionamiento, stand-by, intermitente, etc)
- Fecha de inicio del servicio actual

A esto se podrá añadir:

- Función
- Valores de operación
- Marca, modelo
- Tiempo operacional proyectado

Se puede agregar más información, de acuerdo a su disponibilidad.

#### **4.2.4. MODELADO FUNCIONAL DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA**

Una vez que se tenga la división y subdivisión del sistema, se debe conocer la dependencia operativa o funcional de los equipos basándose en la configuración propuesta durante la fase de ingeniería conceptual del proyecto.

Como se mencionó en capítulos anteriores, existen distintas técnicas de modelaje, pero la que se recomienda en este proyecto es el uso de diagramas de bloques debido a su simplicidad. Para aplicar este método, se debe asumir lo siguiente:

- Los modos de falla de cada equipo son independientes.
- Sólo se toma en cuenta dos estados de funcionamiento: Bueno y No funciona
- El análisis es “de arriba hacia abajo”, es decir que se parte de la configuración del sistema y no así del componente.
- La conexión entre componentes depende de la configuración operativa del sistema y no de su topología física.

Además de lo mencionado, se debe saber que los equipos se conectan en serie si al fallar uno de ellos, falla todo el sistema, y se conectan en paralelo cuando el sistema falla al fallar todos los componentes (generalmente ocurre en sistemas con componentes redundantes).

### ***4.3. FASE 2: OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS***

#### ***4.3.1. ASIGNACIÓN DE LOS MODOS DE FALLOS***

Una vez delimitado el sistema y tomando en cuenta los equipos que lo componen, se puede asignar a cada equipo los distintos y posibles modos de fallo para cada uno. Este paso viene acompañado de una investigación previa del sistema, es necesario realizar consultas a especialistas y trabajadores del área, ya que la experiencia de estos sirve como fuente fiable al momento de la asignación.

Para que este paso se lleve a cabo de una manera metódica y ordenada, se aconseja realizar un Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE o FMEA en inglés) simplificado y

conciso pero que refleje verdaderamente la relación causa y efecto de cada falla. Se tabulará una hoja de trabajo con la siguiente información mínima por equipo:

- Identidad/descripción del artículo: un código de identificación único y la descripción de cada artículo.
- Función: una breve descripción de la función realizada por el ítem.
- Modo de falla: cada modo de falla de artículo se enumera por separado, ya que puede haber varios para un artículo.
- Posibles causas: las causas probables de cada modo de fallo postulado.
- Método de detección de fallos: características del diseño a través de las cuales se puede reconocer el fallo.
- Efecto de error: nivel local: el efecto del error en la función del elemento.
- Provisiones compensatorias: que podrían mitigar el efecto del fallo.

Esta información complementa y hace uso de los datos adquiridos en los pasos anteriores.

#### ***4.3.2. RECOPIACIÓN DE DATOS***

Este paso se lo realiza simultáneamente con el anterior de modo que al finalizar se obtenga una base de datos para cada equipo y que permita realizar la cuantificación de los indicadores. Para la etapa de ingeniería conceptual, estos datos pueden provenir de distintas fuentes genéricas, opinión de expertos e incluso data histórica de sistemas similares.

Las fuentes genéricas recomendadas para la industria petrolera son:

- Offshore Reliability Data (OREDA) (Para equipos de instalaciones on-shore y off-shore)

- WELL MASTER Para los pozos productores de gas.
- PHMSA (Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration – U.S. Department of Transportation, DOT (para las tuberías)
- IEEE STD 493-1997 (Para equipos eléctricos)
- EXIDA (Para el área de Instrumentación y Control)

En este proyecto, la fuente de información utilizada será la 4ta y 5ta edición del libro Offshore Reliability Data (OREDA), volumen 1 e información adicional proveniente de opinión de expertos. Los datos que se obtendrán del libro OREDA serán la tasa de fallas media, la desviación estándar, y el tiempo máximo de reparación para los modos de fallo críticos de cada equipo (ya que, al existir incertidumbre respecto a ello, se propone elegir el peor escenario, sin embargo, se aconseja recurrir a opiniones de expertos para mejorar esta data), tal como muestra la Figura 4-2.

Figura 4-2: Obtención de datos genéricos del libro OREDA

Volume 1 - Topside Equipment		82		OREDA-2009						
Taxonomy no 1.1.2		Item Machinery Compressors Reciprocating								
Population 32	Installations 10	Aggregated time in service (10 <sup>4</sup> hours)				No of demands 3658				
		Calendar time *		Operational time †						
		0.7323		0.5046						
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 <sup>4</sup> hours)					Active rep. hrs		Manhours	
		Lower	Mean	Upper	SD	n / c	Mean	Max	Mean	Max
Critical	367*	6E-3	347.08	1678.18	693.22	501.19	8.8	250	13	250
Abnormal instrument reading	367†	0.20	451.95	1951.42	756.79	727.25				
Breakdown	1*	1E-3	1.86	7.90	3.05	1.37	16	16*	16	16*
	1†	0.19	2.19	6.09	1.98	1.98				
Erratic output	2*	0.09	2.27	6.84	2.32	2.73	117	207*	141	207*
	2†	0.07	3.41	10.62	3.77	3.96				
External leakage - Process medium	2*	3E-3	5.04	21.49	8.30	2.73	20	20*	14	20*
	2†	0.05	13.26	50.59	18.84	3.96				
External leakage - Utility medium	40*	-	36.68	202.00	100.72	54.63	3.8	45	6.7	81
	40†	-	45.55	246.92	114.85	79.26				
Fail to start on demand	16*	4E-4	17.39	82.87	34.03	21.85	3.4	18	6.9	50
	16†	0.06	24.15	95.41	35.56	31.71				
Fail to stop on demand	11*	0.01	15.40	65.18	25.07	15.02	39	204	42	204
	11†	0.01	37.42	166.98	65.98	21.80				
Low output	2*	1E-3	4.52	19.93	7.83	2.73	3.5	3.5*	11	18*
	2†	2E-3	9.20	40.96	16.16	3.96				
Noise	140*	-	122.03	663.02	308.66	191.19	6.1	135	11	168
	140†	-	140.44	752.91	347.39	277.42				
Overheating	2*	1E-4	3.81	17.89	7.30	2.73	29	29*	19	33*
	2†	9E-4	8.72	39.92	15.93	3.96				
	64*	-	58.83	305.92	135.39	87.40	3.8	18	8.2	36
	64†	5E-4	72.66	356.65	149.99	126.82				

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos genéricos OREDA

OREDA muestra datos para un tiempo denominado “Calendar time” (simbolizado con \*), el cual hace referencia al tiempo total de estudio; y para un tiempo denominado “Operational time” (simbolizado con †) que es el tiempo en el que un ítem funciona según su requerimiento durante el tiempo de estudio, por lo que se ve conveniente utilizar este último.

#### ***4.3.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA***

Hasta este punto, ya se tienen los recursos y la estructura necesarios para la cuantificación de los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del análisis. Para ello, se recomienda seguir previamente el procedimiento para la actualización de los datos de falla, descrito en la sección 3.2.4. de este proyecto. Entonces, los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Actualización de los datos de fallo de los equipos: Este paso se lo realiza si se cuenta con datos adicionales, con el fin de enriquecer la información ya obtenida. En el punto 3.2.4.2. de este proyecto, se menciona el procedimiento y las ecuaciones necesarias para ello, elaborado por Medardo Yañez y Karina Semeco. Este procedimiento también asume que las tasas de fallo de cada equipo se suman si existen más de un modo de fallo por equipo y que el tiempo sigue una distribución exponencial.

Selección de las ecuaciones de distribución adecuadas: Como estamos utilizando datos del libro OREDA, la distribución de los datos correcta es la distribución GAMMA, para la tasa de fallas y la distribución EXPONENCIAL para el tiempo de falla. La siguiente tabla muestra la distribución probabilística de las tasas de falla de otras fuentes de información genérica.

Tabla 4-1: Distribución probabilística de las tasas de falla de distintas fuentes de datos genéricos

BASE DE DATOS GENÉRICA DE TASAS DE FALLA ( $\lambda$ )	DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LA TASA DE FALLAS ( $\lambda$ )
<b>OREDA</b>	Gamma
<b>PARLOC</b>	Lognormal
<b>WELL MASTER</b>	Lognormal
<b>IEE</b>	Lognormal
<b>SINTEF</b>	Lognormal

Fuente: Adaptado de Confiabilidad y Disponibilidad de Equipos, con base en Datos Genéricos y Opinión de Expertos, Yañez & Semeco, 2005, pág. 8

- 2) Cuantificación de los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para cada equipo: Los indicadores deben ser cuantificados para el tiempo de operación de los equipos durante el tiempo de vida útil esperado. Como se mencionó en el punto anterior, los tiempos siguen una distribución de probabilidades exponencial, por lo tanto, la confiabilidad se calculará como:

$$C = e^{-\lambda t} \quad (4-1)$$

Dónde:

$\lambda$  = Tasa de fallos [fallas/ h]

t = Tiempo de operación del equipo [h]

- 3) Cuantificación de los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema, basados en el diagrama de bloques elaborado con anterioridad.

#### **4.4. FASE 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

##### **4.4.1. JERARQUIZACIÓN DE LOS EQUIPOS**

Uno de los primeros resultados que se obtienen a partir de aplicar todo lo anterior, es la jerarquización de los equipos. Con esto se puede evaluar de forma cuantitativa qué equipos

presentarán más fallas durante el tiempo de trabajo, cuáles presentan mayor disponibilidad. De manera simplificada, se puede recurrir a evaluar porcentualmente, qué equipos tienen mayor aporte en la confiabilidad e indisponibilidad del sistema, entonces, el riesgo de falla y de indisponibilidad se calculará de la siguiente manera:

$$R_{falla} = P_{falla} \times C \quad (4-2)$$

Dónde:

$R_{falla}$  = Riesgo de falla

$P_{falla}$  = Probabilidad de falla

$C$  = Consecuencia

Siendo:

Sin falla = 0

Falla completa del sistema = 1

Para la indisponibilidad del sistema se procede de la misma forma, recordando que la indisponibilidad es igual a:

$$Indisponibilidad = 1 - Disponibilidad \quad (4-3)$$

Para un análisis más detallado, se podrá realizar un análisis de criticidad respecto al impacto económico, ambiental y de seguridad de cada componente sobre el sistema.

#### **4.4.2. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS**

Una vez realizado el punto anterior, se presentarán opciones alternativas al sistema estudiado, que busquen suplir las deficiencias que este presenta. Por ejemplo, el uso de

equipos redundantes o equipos de mejores características en cuanto a confiabilidad se refiere.

#### **4.4.3. ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA**

Otra parte importante para la aplicación de un análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad a un proyecto en la etapa de ingeniería conceptual, es importante conocer el costo del ciclo de vida del sistema. Mediante este cálculo podemos comparar las alternativas de un mismo proyecto, es decir que ayuda a tomar decisiones al momento de seleccionar entre una u otra opción, en función a los costos estimados y proyectados al tiempo de uso de los equipos.

Para el cálculo del costo de ciclo de vida se pone especial énfasis en el cálculo del CAN (Costo Actual Neto) y del CAE (Costo Anual Equivalente) ya que permiten ver el coste del proyecto a lo largo del ciclo de vida de los equipos. Para ello se emplearán las ecuaciones (2-26), (2-27), (2-28) y (2-29). Además, para el cálculo del costo por baja confiabilidad en el sistema se utilizará la siguiente ecuación:

$$C_{BC} = \lambda \times (TPFS \times (CPP + CP) + CD_{\lambda}) \quad (4-4)$$

Dónde:

$C_{BC}$  = Costo por baja confiabilidad [\$]

$\lambda$  = Frecuencia o tasa de falla [fallas/año]

$TPFS$  = Tiempo promedio fuera de servicio [h/falla]

$CP$  = Costos de penalización [\$/hora]

$CPP$  = Costos por pérdida de producción [\$/hora]

$CD_{\lambda}$  = Costos directos por falla [\$]

Se asume que la tasa de fallas es constante en el tiempo.

#### 4.4.4. COMPARACIÓN ENTRE ALTERNATIVAS

Los resultados económicos y de los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, permitirán hacer una comparación entre las distintas alternativas de configuración del sistema, con esto se escoge la mejor o mejores opciones basadas en los objetivos planteados al principio, pero también permite asentar objetivos de diseño, reformularlos y sustentar esa reformulación.

#### 4.5. ESQUEMATIZACIÓN DEL MÉTODO

A modo de resumir el modelo metodológico, se presenta a continuación los esquemas representativos.

##### 4.5.1. ESQUEMA GENERAL DEL MODELO METODOLÓGICO

Figura 4-3: Esquema general del modelo metodológico



Fuente: Elaboración propia

Este esquema general esquematiza las fases involucradas en el proceso para la realización del análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de un proyecto, como se puede observar, se cuenta con tres fases principales.

#### 4.5.2. SECUENCIA GENERAL DE PASOS

La Figura 4-4 muestra la secuencia general de pasos para aplicar el modelo metodológico propuesto a cualquier sistema productivo de la industria de gas y petróleo, como se puede observar, consta de 11 pasos. Dichos pasos están enmarcados en cuadros de distintos colores para distinguir las fases de trabajo en las que están incluidas, el color naranja representa la fase inicial, el color verde, representa a la segunda fase y el color verde representa a la tercera fase.

Figura 4-4: Secuencia general de pasos del modelo metodológico

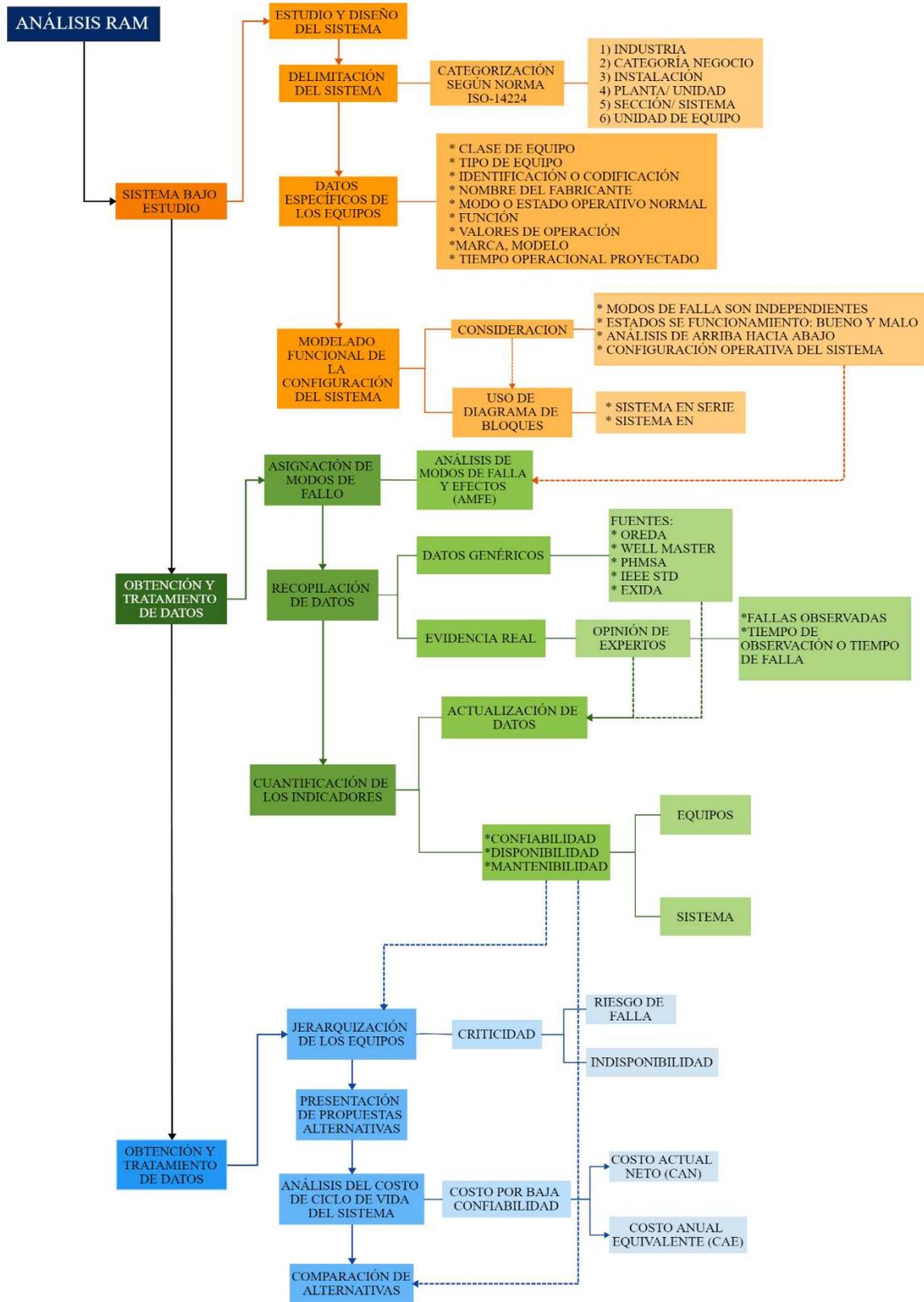


Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.3. ESQUEMA DESARROLLADO DEL MODELO METODOLÓGICO

A continuación, se desarrolla el esquema del modelo metodológico con más detalle. Las flechas con líneas punteadas muestran una relación entre pasos, por ejemplo, recolectar y clasificar los datos específicos de cada equipo, es un paso previo e importante para la asignación de modos de fallo. Las flechas continuas representan el orden que siguen los pasos.

Figura 4-5 : Esquema desarrollado del modelo metodológico



Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO 5. APLICACIÓN PRÁCTICA A UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO**

A continuación, se hace la aplicación del modelo metodológico para el sistema básico de propano, con el fin de realizar el análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad sobre el cual, al finalizar, se puedan realizar observaciones que ayuden a mejorar la configuración del sistema.

### **5.1. FASE 1: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO**

El objetivo de este diseño, es tener una base sobre la cual realizar el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

#### **5.1.1. ESTUDIO Y DISEÑO PREVIO DEL SISTEMA**

##### *5.1.1.1. Diseño analítico*

La siguiente tabla muestra las características del gas de entrada al sistema refrigeración con propano, con las cuales se diseñará el sistema.

Tabla 5-1: Datos para el diseño y simulación del sistema básico de refrigeración con propano

<b>DATOS DE ENTRADA</b>	
<b>GAS NATURAL</b>	
<b>TEMPERATURA DE ENTRADA</b>	22,7 [°F]
<b>TEMPERATURA DE SALIDA</b>	3,5 [°F]
<b>CAUDAL</b>	35 [MMSCFD]
<b>Cp [BTU/lb°F]</b>	0,67 [BTU/lb°F]
<b>CANTIDAD DE CONDENSADO DESEADO</b>	4%
<b>CALOR DE CONDENSACIÓN</b>	200 [BTU/HR]
<b>PROPANO</b>	
<b>PRESIÓN DE ALTA</b>	250 [PSIa]
<b>PRESIÓN DE BAJA</b>	30 [PSIa]

COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL	
COMPONENTE	%Molar
<b>METANO</b>	92,68
<b>ETANO</b>	2,75
<b>PROPANO</b>	1,53
<b>I-BUTANO</b>	1,28
<b>N-BUTANO</b>	1,10
<b>I-PENTANO</b>	0,27
<b>N-PENTANO</b>	0,19
<b>HEXANO</b>	0,09
<b>HEPTANO</b>	0,06
<b>CO2</b>	0,02
<b>H2O</b>	0,02
<b>N2</b>	0,01
<b>TOTAL</b>	100,00

Fuente: Elaboración propia a partir de la recopilación de información citada en bibliografía.

#### a) Cálculo de la capacidad de refrigeración del sistema

- Cálculo del peso molecular aproximado del gas natural

Tabla 5-2: Cálculo del peso molecular del gas natural de entrada

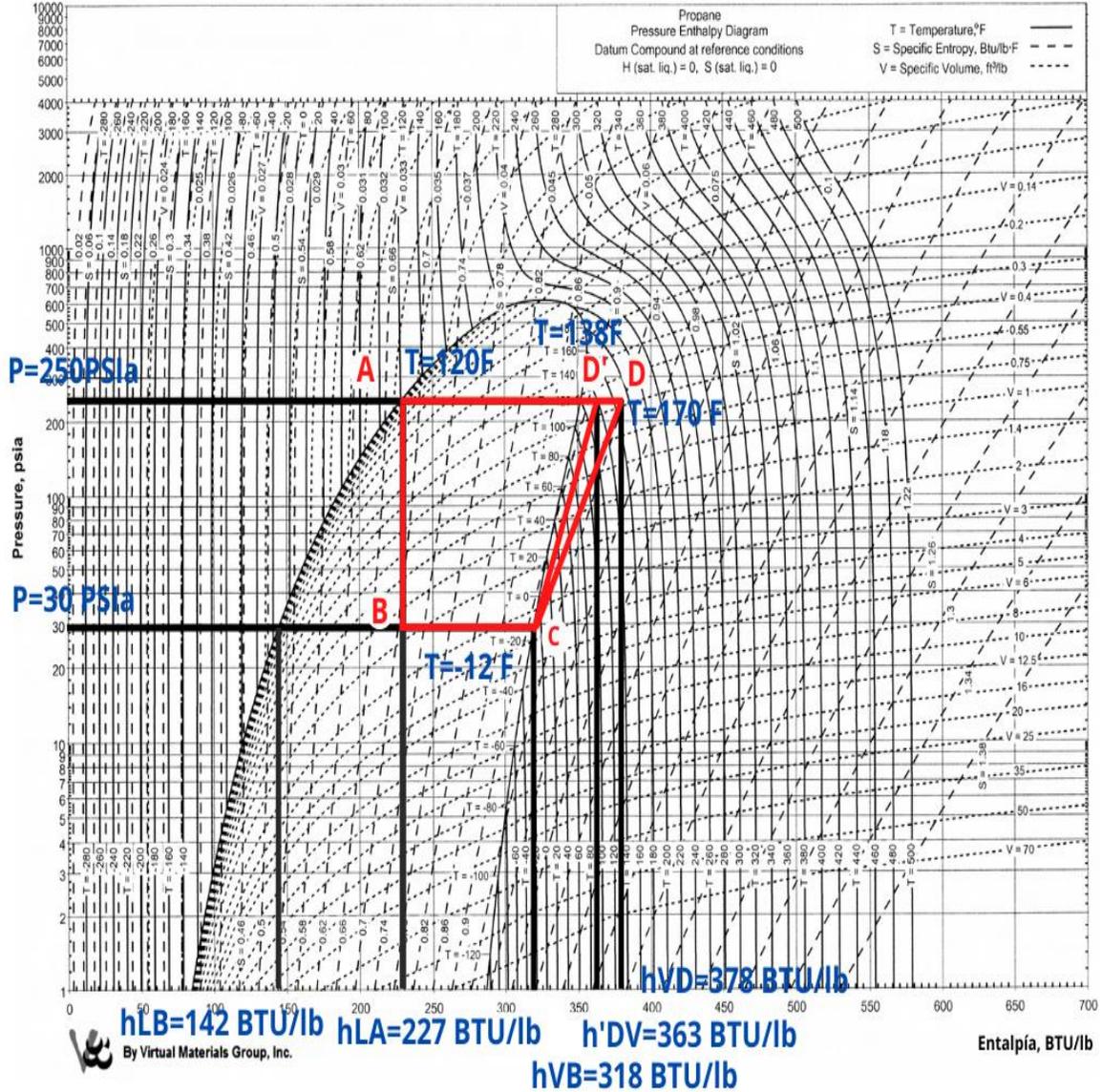
COMPONENTE	% Molar	$X_i$	$M_i$ [lb/mol]	$X_i \cdot M_i$ [lb/mol]
<b>Metano</b>	92,68	0,93	16,04	14,87
<b>Etano</b>	2,75	0,03	30,07	0,83
<b>Propano</b>	1,53	0,02	44,10	0,67
<b>i-Butano</b>	1,28	0,01	58,12	0,74
<b>n-Butano</b>	1,10	0,01	58,12	0,64
<b>i-Pentano</b>	0,27	0,00	72,15	0,19
<b>n-Pentano</b>	0,19	0,00	72,15	0,14
<b>Hexano</b>	0,09	0,00	86,18	0,08
<b>Heptano</b>	0,06	0,00	100,21	0,06
<b>CO2</b>	0,02	0,00	44,01	0,01
<b>H2O</b>	0,02	0,00	18,02	0,00
<b>N2</b>	0,01	0,00	28,01	0,00
<b>TOTAL</b>	100	1	-	18,24

Fuente: Elaboración propia

$$M_{GN} = 18,24 \left[ \frac{lb}{lbmol} \right]$$

- Representación de los datos en el diagrama de Mollier

Gráfica 5-1: Ciclo de termodinámico P-H del sistema de refrigeración con propano diseñado



Fuente: Elaboración propia con ayuda del gráfico Presión – Vs. Entalpía

- Cálculo de la masa de gas natural que debe enfriarse

$$m_{GN} = 35 \times 10^6 \left[ \frac{SCF}{d} \right] \times 18,24 \left[ \frac{lb}{lbmol} \right] \times \left[ \frac{1 lbmol}{379,5 SCF} \right] * \frac{1d}{24h}$$

$$m_{GN} = 70092,2 \left[ \frac{lb}{h} \right]$$

- Cálculo de la capacidad de enfriamiento del Chiller (Duty)

$$Q_{CHILLER} = m_{GN} \times C_p \times \Delta_T + m_{condensado} \times \lambda_c$$

$$Q_{CHILLER} = 70092,2 \left[ \frac{lb}{h} \right] \times 0,67 \left[ \frac{BTU}{lb^{\circ}F} \right] \times (22,7 - 3,5)^{\circ}F + 70092,2 \left[ \frac{lb}{h} \right] \times 0,04 \times 200 \left[ \frac{BTU}{lb} \right]$$

$$Q_{CHILLER} = Q_{Refrigeración} = 1,46 * 10^6 \left[ \frac{BTU}{h} \right]$$

#### b) Cálculo de la masa de propano necesaria

Del diagrama obtenemos lo siguiente:

$$h_{VB} = 318 \text{ [BTU/lb]}$$

$$h_{LA} = 227 \text{ [BTU/lb]}$$

Entonces tenemos:

$$m = \frac{Q_{Refrigeración}}{(h_{VB} - h_{LA})} = \frac{1,46 * 10^6 \left[ \frac{BTU}{h} \right]}{(318 - 227) \left[ \frac{BTU}{lb} \right]}$$

$$m_{Propano} = 16044,96 \left[ \frac{lb}{h} \right]$$

#### c) Trabajo realizado por el compresor

$$h'_{VD} = 363 \text{ [BTU/lb]}$$

$$h_{VB} = 318 \text{ [BTU/lb]}$$

$$m_{Propano} = 16044,96 \text{ [lb/h]}$$

$$\eta_i = 75\%$$

$$h_{VD} = \frac{(h'_{VD} - h_{VB})}{\eta_i} + h_{VB} = \frac{363 - 318}{0.75} + 318 = 378 \left[ \frac{BTU}{lb} \right]$$

$$W = \frac{W_{ideal}}{\eta_i} = \frac{m(h'_{VD} - h_{VB})}{\eta_i} = \frac{16044,96 \left[ \frac{lb}{h} \right] \times (363 - 318) \left[ \frac{BTU}{lb} \right]}{0.75}$$

$$= 962697,6 \left[ \frac{BTU}{h} \right] \times \frac{1 HP}{2544,4 BTU/h}$$

$$W = 378,36 [HP]$$

**d) Cálculo de la capacidad del condensador**

$$h_{VD} = 378 [BTU/lb]$$

$$h_{LA} = 227 [BTU/lb]$$

$$m_{Propano} = 16044,96 [lb/h]$$

$$Q_{dc} = m(h_{VD} - h_{LA}) = 16044,96 \left[ \frac{lb}{h} \right] \times (378 - 227) \left[ \frac{BTU}{lb} \right]$$

$$Q_{dc} = -2,42 * 10^6 \left[ \frac{BTU}{h} \right]$$

**e) Cálculo de la fracción de líquido formado durante la expansión**

$$h_{VB} = 319 [BTU/lb]$$

$$h_{LA} = 227 [BTU/lb]$$

$$h_{LB} = 142 [BTU/lb]$$

$$X = \frac{h_{VB} - h_{LA}}{h_{VB} - h_{LB}}$$

$$X = \frac{318 - 227}{318 - 142}$$

$$X = 0,52$$

**f) Resultados**

Tabla 5-3: Tabla de resultados del diseño del sistema básico refrigeración con propano

TABLA DE RESULTADOS	
Capacidad de refrigeración del sistema	$1,46 * 10^6 \left[ \frac{BTU}{h} \right]$
Masa necesaria de propano	$16044,96 \left[ \frac{lb}{h} \right]$
Trabajo realizado por el compresor	$378,36 [HP]$
Capacidad del condensador	$-2,42 * 10^6 \left[ \frac{BTU}{h} \right]$
Fracción de líquido de propano formado durante la expansión	0,52

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.1.2. Simulación del sistema de refrigeración con propano con ASPEN HYSYS

La simulación presente simulación fue realizada con datos de la Tabla 5-1 y Tabla 5-3, bajo el siguiente detalle:

- La corriente de entrada de propano a la válvula J-T (VJT-100) tiene un flujo másico de  $16044,96 \left[ \frac{lb}{h} \right]$ , una presión de entrada de 250 [PSIg] y una presión a la salida es de 30 [PSIg].
- La corriente de gas natural que ingresa al chiller (E-100) tiene un caudal de 35[MMSCFD] y 22,7 [°F] de temperatura; la presión de salida del gas propano se mantiene en 30 [PSIg].
- La presión de descarga del compresor (C-100) es de 250 [PSIg].
- La temperatura de salida del condensador (AE-100) es de 120 [°F].

Debe notarse que no todos los equipos pueden ser representados en el entorno virtual, como ser el caso del acumulador y del depurador de succión, por lo que se colocó un

equipo mezclador que no afectan al proceso, en el caso del acumulador, y un separador vertical en el caso del depurador; de este modo se podrá observar la disposición de los equipos.

Con el fin complementar un poco el proceso de ajuste Dew Point y comprobar el funcionamiento del sistema de propano, se simula también, de forma simplificada, los pasos para llevar al gas de salida del chiller, a condiciones de venta, bajo el siguiente detalle:

- El gas natural enfriado sale del Chiller (E-100) e ingresa a un separador vertical con el fin de ser separado de componentes más pesados (líquidos del gas natural).
- Ingresa a un compresor (K-100), donde se acondiciona el gas a 640 [PSIg], para controlar que el punto de rocío sea menor a 32 [°F].

### **Resultados:**

Como se puede observar en la Tabla 5-4, los resultados de capacidad o potencia de los equipos no son muy diferentes a los calculados de manera analítica, la diferencia puede deberse a que el simulador emplea cálculos adicionales diferentes a las ecuaciones empleadas.

La Tabla 5-5 muestra los puntos que el programa otorga para graficar de la curva de rocío del gas natural tanto al ingreso como a la salida del sistema de control de punto de rocío.

Tabla 5-4: Resultados de la simulación con Aspen Hysys

CIRCUITO DE PROPANO							
EQUIPO	VÁLVULA J-T	CHILLER	SCRUBBER	COMPRESOR	CONDENSADOR	ACUMULADOR	BOMBA
CÓDIGO	VJT-100	E-100	S-101	C-100	AE-100	ACUM-100	B-100
DATOS DE ENTRADA	P [Psi]	250	30	30	30	250	243,5
	T [°F]	120,1	-12,16	-12,16	-12,16	165	120
	Flujo molar [MMSCFD]	3,313	3,313	3,313	3,313	3,313	3,313
	Fracción líquida	1	0,51	0	0	0	1
	Fracción de vapor	0	0,49	1	1	1	0
DATOS DE SALIDA	P [Psi]	30	30	30	165	243,5	243,5
	T [°F]	-12,16	-12,16	-12,16	250	120	120
	Flujo molar [MMSCFD]	3,313	3,313	3,313	3,313	3,313	3,313
	Fracción líquida	0,51	0	0	0	1	1
	Fracción de vapor	0,49	1	1	1	0	0
POTENCIA [HP]	-	-	-	359,7	-	-	0,36
CAPACIDAD [BTU/h]	-	1,43E+06	-	-	-2,35E+06	-	0

Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 10

Como se puede observar, para una presión de 640 [PSIg], la temperatura del punto de rocío era de 46,28 [°F] en el ingreso y de 15, 52 [°F] a la salida, con lo cual se cumplen las condiciones de gas de venta.

Tabla 5-5: Punto de rocío del Gas Natural

Punto de Rocío del Gas Natural			
INGRESO		SALIDA	
Temperatura	Presión	Temperatura	Presión
29,39	-22,38	29,39	-54,91
48,46	-9,96	48,46	-42,75
79,43	2,80	79,41	-30,08
164,29	21,78	163,94	-10,93
330,97	38,16	328,20	6,09
636,16	46,28	620,67	15,46
640,00	46,28	640,00	15,52
652,08	46,30	669,56	15,62

Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 10

### 5.1.2. DELIMITACIÓN DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO

La siguiente tabla muestra la categorización para el sistema básico de refrigeración con propano con ayuda de la norma 14224:2016.

Tabla 5-6: Categorización general del sistema de refrigeración con propano

CATEGORÍA PRINCIPAL	NIVEL TAXO-NÓMICO	JERARQUÍA DE TAXONOMÍA	DEFINICIÓN
<b>ATRIBUTOS DE USO/ UBICACIÓN</b>	1	INDUSTRIA	GAS NATURAL
	2	CATEGORÍA DE NEGOCIO	MIDSTREAM
	3	CATEGORÍA DE INSTALACIÓN	PLANTA DE TRATAMIENTO DE GAS NATURAL
	4	CATEGORÍA DE PLANTA O UNIDAD	AJUSTE DE PUNTO DE ROCÍO
	5	SECCIÓN / SISTEMA	REFRIGERACIÓN CON PROPANO
<b>SUBDIVISIÓN DE EQUIPOS</b>	6	EQUIPO	COMPRESOR DE PROPANO
			CONDENSADOR DE PROPANO
			ACUMULADOR DE PROPANO
			BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO
			DEPURADOR DE SUCCIÓN (SCRUBBER)
			CHILLER (INTERCAMBIADOR DE CALOR)
			VÁLVULA J-T

Fuente: Elaboración propia siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 14224:2016

### 5.1.3. DATOS ESPECÍFICOS PARA CADA EQUIPO

Como ya se tienen identificados los equipos principales del sistema en la Tabla 5-6, se procede a detallar la información, a continuación, se muestran los datos específicos para cada equipo del sistema de refrigeración con propano.

Tabla 5-7: Datos específicos de los equipos

NIVEL DE TAXONOMÍA	EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	FUNCIÓN	VALORES DE OPERACIÓN	MARCA	MODELO	FABRICANTE	MODO O ESTADO OPERATIVO NORMAL	TIEMPO OPERACIONAL PROYECTADO [años]	FECHA DE INICIO DEL SERVICIO ACTUAL
6	COMPRESOR DE PROPANO	RECIPROCANTE	C-100	COMPRI-MIR EL GAS PROPANO PROVENIENTE DE S-100	Pea-ga = 30 PSia, P <sub>des</sub> = 250 PSia, Pot. calculada = 376,9 HP (2810.5 kW), Pot. Nominal = 3600 kW	GENERAL ELECTRIC	HM SERIES	GENERAL ELECTRIC COMPANY	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023
6	CONDENSADOR DE PROPANO	AEREO ENFRIADOR	AE-100	CONDENSAR EL GAS PROPANO PROVENIENTE DE C-100	Pop. = 250 PSia, Pot. = 2.5E+06 BTU/h (734 kW), Pot. Nominal = 2300 kW	FRIGOSYSTEM COREMA	RACA HEAVY DUTY	FRIGOSYSTEM COREMA	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023
6	ACUMULADOR DE PROPANO	TANQUE PRESURIZADO	ACUM-100	ALMACENAR TEMPORALMENTE EL PROPANO LIQUIDO PROVENIENTE DE AE-100	Pop. = 250 PSia	No indica	No indica	SYNERTECH	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023
6	BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	CENTRIFUGA	B-100	CIRCULAR EL PROPANO PROVENIENTE DE ACUM-100	Q <sub>calc.</sub> = 2318 Bbl/d (62.3 GPM), P <sub>op</sub> = 250 PSI, Q <sub>nom.</sub> = 90 GPM, P <sub>máx</sub> = 300 PSI, T <sub>máx op</sub> = 500 F	LIQUIFLO	CENTRI MODEL 621	LIQUIFLO	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023
6	DEFURADOR DE SUCCIÓN	SCRUBBER	S-100	SEPARAR LA FASE LIQUIDA DE LA FASE VAPOK DEL PROPANO PROVENIENTE DE E-100	P <sub>op</sub> = 250 psig	SOLBERG	V502	SOLBERG	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023
6	CHILLER	INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA Y TUBOS	E-100	INTERCAMBIAR CALOR ENTRE EL PROPANO PROVENIENTE DE VJT-100 Y EL GAS NATURAL DISMINUIR ADIABATICAMENTE LA PRESION DE CIRCULACIÓN DEL PROPANO PROVENIENTE DE B-100	Cap. = 1.417E6 (BTU/h) (357317 kcal/h), Cap. Nom. = 371000 [kcal/h]	EKIN ENDUSTRYEL	MIT.B.YS.25.300	EKIN ENDUSTRYEL	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023
6	VÁLVULA J-T	VÁLVULA GLOBO	VJT-100		P <sub>op</sub> = 250 psig, T <sub>mín</sub> = -12.16 F, T <sub>máx</sub> = 120 F	EMERSON	7001	EMERSON	FUNCIONA-MIENTO	8	1/7/2023

Fuente: Elaboración propia siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 14224:2016 y en base a la bibliografía consultada

- Como se puede observar, el tiempo operacional proyectado es de 8 años; sin embargo, el análisis es anual. Tomando en cuenta 10 días de mantenimiento preventivo, que es lo que se suele establecer en la industria, el tiempo operacional anual para los equipos es:

$$365 \frac{\text{días}}{\text{año}} - 10 = 355 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

$$1 \text{ años} * 355 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 8520 [h]$$

- Los valores de operación, provienen del diseño previo realizado en el punto anterior y las marcas, modelos y fabricantes se obtuvieron a partir de consultas de catálogos.

#### 5.1.4. MODELADO FUNCIONAL DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

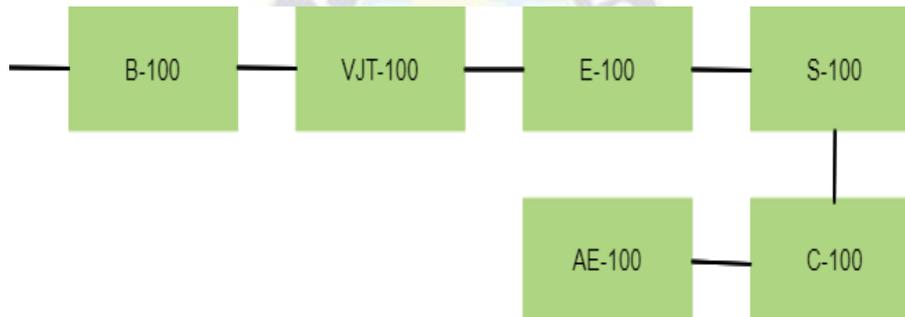
Tabla 5-8: Relaciones funcionales entre equipos

ETAPA	EQUIPO	CÓDIGO	FUNCIÓN
<b>INTERETAPA</b>	ACUMULADOR	ACUM-100	ALMACENAR TEMPORALMENTE EL PROPANO LÍQUIDO PROVENIENTE DE AE-100
<b>INTER-ETAPA</b>	BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	B-100	CIRCULAR EL PROPANO PROVENIENTE DE ACUM-100
<b>EXPANSIÓN</b>	VÁLVULA J-T	VJT-100	DISMINUIR ADIABÁTICAMENTE LA PRESIÓN DE CIRCULACIÓN DEL PROPANO PROVENIENTE DE B-100
<b>EVAPORACIÓN</b>	CHILLER	E-100	INTERCAMBIAR CALOR ENTRE EL PROPANO PROVENIENTE DE VJT-100 Y EL GAS NATURAL
<b>INTER-ETAPA</b>	SCRUBBER	S-100	SEPARAR LA FASE LÍQUIDA DE LA FASE VAPOR DEL PROPANO PROVENIENTE DE E-100
<b>COMPRESIÓN</b>	COMPRESOR	C-100	COMPRESOR EL GAS PROPANO PROVENIENTE DE S-100
<b>CONDENSACIÓN</b>	AERO-ENFRIADOR	AE-100	CONDENSAR EL GAS PROPANO PROVENIENTE DE C-100

Fuente: Elaboración propia

El sistema de bajo estudio, es un circuito bajo en el cual propano circula para completar cuatro etapas principales, la expansión, la evaporación, compresión y la condensación. Como se puede observar en la Tabla 5-8, todos los equipos tienen una función operacional importante, exceptuando el acumulador, por lo que se puede asumir que su existencia no tiene implicancia en la confiabilidad o disponibilidad del sistema, es por esta razón que será descartado del análisis. Teniendo en cuenta el orden de los equipos y sus relaciones funcionales, el diagrama de bloques del sistema es el siguiente:

Figura 5-1: Diagrama de bloques para el sistema de refrigeración con propano



Fuente: Elaboración propia

Al ser un sistema básico de refrigeración con propano, en la Figura 5-1 se puede observar que las relaciones funcionales de todos los componentes del sistema se encuentran en serie, es decir que cada operación ocurre una después de otra.

## **5.2. FASE 2: OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS**

### **5.2.1. ASIGNACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO**

La siguiente tabla muestra el análisis de modos y efectos de falla para los seis equipos considerados durante el análisis RAM. Se puede observar que la asignación de modos de fallos dependerá del criterio del analista, pero también de la información recolectada del estudio previo del sistema y de la experiencia de profesionales expertos en el área.

Tabla 5-9: Análisis de Modos de Falla y Efectos

EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	FUNCIÓN	MODOS DE FALLA	POSIBLES CAUSAS	EFFECTOS DE LA FALLA	MÉTODO DE DETECCIÓN			
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	CENTRÍFUGA	B-100	CIRCULAR EL PROPANO PROVENIENTE DE ACUM-100	VIBRACIÓN	PROBLEMAS EN LA VÁLVULA DE RETENCIÓN PARTES GIRATORIAS ROZANDO EXCESIVO IMPULSO HIDRAULICO IMPULSOR OBSTRUIDO, DAÑADO O DESBALANCEADO ROTURA O DESGASTE DE LOS SELLOS	FUGAS  DESGASTE EN PARTES  FUGAS DE PROPANO	SENSOR DE VIBRACIONES  CONTROL DE LA PRESIÓN DE DESCARGA			
				FUGA EXTERNA	GOLPE DE LÍQUIDO TEMPERATURA DE DESCARGA ELEVADA PROBLEMAS DE LUBRICACIÓN	PARO DE OPERACIONES CONTAMINACIÓN DEL SISTEMA FUGAS	CONTROL DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN			
COMPRESOR DE PROPANO	RECIPROCANTE	C-100	COMPRIER EL GAS PROPANO PROVENIENTE DE S-100	ROTURA MECÁNICA	FALTA DE REFRIGERANTE ALTA PRESIÓN DE DESCARGA BAJA PRESIÓN DE SUCCIÓN PÉRDIDA DEL SELLOS O JUNTAS ROTURA PERNOS DESALUSTADOS	RETORNO DE LÍQUIDO ROTURA MECÁNICA PROBLEMAS DE LUBRICACIÓN	USO DE TERMOMETRO DE CONTACTO			
				SOBRECALENTAMIENTO						
				PÉRDIDAS DE GAS						
				TRANSFERENCIA DE CALOR INSUFICIENTE						
CONDENSADOR DE PROPANO	AEREO ENFRIADOR	AE-100	CONDENSAR EL GAS PROPANO PROVENIENTE DE C-100		ALETAS DAÑADAS	DISMINUCIÓN DE LA EFICIENCIA DE CONDENSACIÓN DEL PROPANO	CONTROL DE TEMPERATURA DE SALIDA			
DEPURADOR DE SUCCIÓN	SCRUBBER	S-100	SEPARAR LA FASE LÍQUIDA DE LA FASE VAPOR DEL PROPANO PROVENIENTE DE E-100	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	OBSTRUCCIONES, CORROSIÓN, FATIGA	PARO DE OPERACIONES	INSPECCIONES PERIÓDICAS			
CHILLER	INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA Y TUBOS	E-100	INTERCAMBIAR CALOR ENTRE EL PROPANO PROVENIENTE DE VIT-100 Y EL GAS NATURAL	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	FATIGA, CORROSIÓN OBSTRUCCIONES	PARO DE OPERACIONES	SISTEMA DE ALARMA			
VÁLVULA J-T	VÁLVULA GLOBO	VIT-100	CIRCULACIÓN DEL PROPANO PROVENIENTE DE B-100	FALLA AL REGULAR	DESGASTE DE LAS PARTES	REDUCCIÓN EN LA CAÍDA DE PRESIÓN NECESARIA	CONTROL DE LA PRESIÓN DE DESCARGA			
				FALLA AL CERRAR	ABOLLADURA EN EL ASIENTO DE LA VÁLVULA					

Fuente: Elaboración propia

Es recomendable seleccionar sólo los modos de fallos considerados críticos o los modos de fallos más importantes, ya que mencionar aquellos modos de fallos que no producen alteraciones graves en el componente y no influyen sobre el sistema en general.

### 5.2.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

Las siguientes tablas muestran la recopilación de datos para cada equipo.

Tabla 5-10: Datos genéricos y datos adicionales

DATOS GENÉRICOS						
EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	MODO DE FALLA	TASA DE FALLOS MEDIA/10 <sup>6</sup> h	DESVIACIÓN ESTÁNDAR/10 <sup>6</sup> h	TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN PARA CADA MODO DE FALLO[h]
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	CENTRÍFUGA	B-100	VIBRACIÓN	73,17	86,14	77
			FUGA EXTERNA	8,89	48,13	96
COMPRESOR DE PROPANO	RECIPROCANTE	C-100	ROTURA MECÁNICA	3,41	3,77	207
			SOBRECALENTAMIENTO	72,66	149,99	18
			PÉRDIDAS DE GAS	45,55	114,85	45
CONDENSADOR DE PROPANO	AEREO ENFRIADOR	AE-100	TRANSFERENCIA DE CALOR INSUFICIENTE	6,85	6,85	6
DEPURADOR DE SUCCIÓN	SCRUBBER	S-100	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	6,46	4,28	14
CHILLER	INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA Y TUBOS	E-100	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	5,72	14,19	40,5
VÁLVULA J-T	VÁLVULA GLOBO	VJT-100	FALLA AL REGULAR	4,93	7,94	12,5
			FALLA AL CERRAR	2,68	4,07	15
DATOS ADICIONALES						
EQUIPO		TIPO DE EQUIPO		IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	NÚMERO DE FALLAS OBSERVADAS	
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO		CENTRÍFUGA		B-100	3	
COMPRESOR DE PROPANO		RECIPROCANTE		C-100	3	
CONDENSADOR DE PROPANO		AEREO ENFRIADOR		AE-100	2	
DEPURADOR DE SUCCIÓN		SCRUBBER		S-100	1	
DEPURADOR DE SUCCIÓN		INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA Y TUBOS		E-100	1	
VÁLVULA J-T		VÁLVULA GLOBO		VJT-100	3	
TIEMPO DE OBSERVACIÓN [h]						34080

Fuente: Elaboración propia en base los datos recopilados del libro OREDA (4ta y 5ta versión) y información citada en bibliografía

### 5.2.3. CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD

Estos cálculos son realizados utilizando la Tabla 5-10. Ya que se deben repetir los mismos cálculos para varios equipos, en este capítulo sólo se realizarán los cálculos para la bomba de circulación, el resto de los cálculos podrán ser encontrados en el apartado de Anexos.

#### 5.2.3.1. Actualización de las tasas de falla

- **Suma de tasas de falla para cada equipo**

- Bomba de circulación:

$$\lambda_{bomba} = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\lambda_{bomba} = (73.17 + 8.89) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\lambda_{bomba} = 0,000082 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- **Suma de las desviaciones estándar para cada equipo**

- Bomba de circulación:

$$\sigma_{bomba} = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\sigma_{compresor} = (3,77 + 149,99 + 114,85) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\sigma_{bomba} = 0,000269 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- **Actualización de las tasas de falla**

Para la actualización de los datos de fallo, se utilizan las ecuaciones (2-11):

$$\lambda_{actualizada} = \frac{r + \left(\frac{\bar{\lambda}}{\sigma_{\lambda}}\right)^2}{T + \frac{\bar{\lambda}}{\sigma_{\lambda}^2}}$$

Dónde:

T= Tiempo total de operación acumulado por la población de equipos

r = Número de fallas observadas en la población de equipos (datos adicionales)

$\lambda$  = Parámetro de la distribución de probabilidad de la variable “tiempo para la falla” (dato genérico)

$\sigma_{\lambda}$  = Desviación estándar de la tasa de fallos (dato genérico)

- Bomba de circulación

$$T = 34080 \text{ [h]}$$

$$r = 3$$

$$\lambda_{bomba} = 0,000082 \text{ [fallas/h]}$$

$$\sigma_{bomba} = 0,000134 \text{ [fallas/h]}$$

$$\lambda_{actualizada} = \frac{3 + \left(\frac{0,000082}{0,000134}\right)^2}{34080 + \frac{0,000082}{0,000134^2}}$$

$$\lambda_{actualizada} = 0,000087 \left[ \frac{\text{fallas}}{\text{h}} \right]$$

En base a los resultados obtenidos, se construye la siguiente tabla:

Tabla 5-11: Actualización de datos de falla

EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	MODO DE FALLA	TASA DE FALLOS MEDIA [fallos/h]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR/10 <sup>6</sup> h	NÚMERO DE FALLAS OBSERVADAS	$\bar{\lambda}$ [fallas/h]	$\sigma_{\bar{\lambda}}$ [fallas/h]	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/h]
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	B-100	VIBRACIÓN	0,00007317	0,00008614	3	0,000082	0,000134	0,000087
		FUGA EXTERNA	0,00000889	0,00004813				
COMPRESOR DE PROPANO	C-100	ROTURA MECÁNICA	0,00000341	0,00000377	3	0,000122	0,000269	0,000090
		SOBRECALENTAMIENTO	0,00007266	0,00014999				
		PÉRDIDAS DE GAS	0,00004555	0,00011485				
CONDENSADOR DE PROPANO	AE-100	TRANSFERENCIA DE CALOR INSUFICIENTE	0,00000685	0,00000685	2	0,000007	0,000007	0,000017
DEPURADOR DE SUCCIÓN	S-100	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	0,00000646	0,00000428	1	0,000006	0,000004	0,000008
CHILLER	E-100	DEFICIENCIA ESTRUCTURAL	0,00000572	0,00001419	1	0,000006	0,000014	0,000041
VÁLVULA J-T	VJT-100	FALLA AL REGULAR	0,00000493	0,00000794	3	0,000008	0,000012	0,000039
		FALLA AL CERRAR	0,00000268	0,00000407				
TIEMPO DE OBSERVACIÓN [h]	34080							

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3.2. Selección de las distribuciones adecuadas

Como se mencionó en el capítulo anterior y según la bibliografía citada, los tiempos de operación siguen una distribución exponencial, por lo tanto, para encontrar la confiabilidad de cada equipo, se reemplazan los tiempos de operación en la ecuación (4-1), dónde:

$$C = e^{-\lambda t}$$

Dónde:

$\lambda$  = Tasa de fallos [fallas/ h]

t = Tiempo de operación del equipo [h]

### 5.2.3.3. Cuantificación de los indicadores de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad

#### a) CONFIABILIDAD DE LOS EQUIPOS

El tiempo esperado de operación de los equipos será de 10 años, sin embargo, al igual que en la mayor parte de la industria petrolera, se espera que operen todo el año, exceptuando los días de mantenimiento (10 días generalmente), tiempo durante el cual los equipos serán restaurados a su condición inicial. Debido a esto, que el tiempo de operación será de 355 días (8520 horas),:

$$C = e^{-\lambda t}$$

$$P_{falla} = 1 - C$$

Dónde:

$P_{falla}$  = Probabilidad de falla

-Bomba de circulación

$$\lambda_{bomba,actualizada} = 0,000008 \text{ [Fallas/h]}$$

$$t = 8520 \text{ [h]}$$

$$C = e^{-0,000087 \cdot 8520}$$

$$C_{Depurador,1 \text{ año}} = 0,47521$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 1 - 0,47521$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 0,52479$$

Con los cálculos realizados, se elabora la siguiente tabla:

Tabla 5-12: Cálculo de la confiabilidad de los equipos

EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	NÚMERO DE FALLAS OBSERVADAS	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/h]	PROBABILIDAD DE FALLA	CONFIABILIDAD
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	B-100	3	0,000087	0,52479	0,47521
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	C-100	3	0,000090	0,53396	0,46604
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	AE-100	2	0,000017	0,13233	0,86767
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	S-100	1	0,000008	0,06967	0,93033
<b>CHILLER</b>	E-100	1	0,000041	0,29436	0,70564
<b>VÁLVULA J-T</b>	VJT-100	3	0,000039	0,28375	0,71625
<b>TIEMPO DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS</b>	8520				

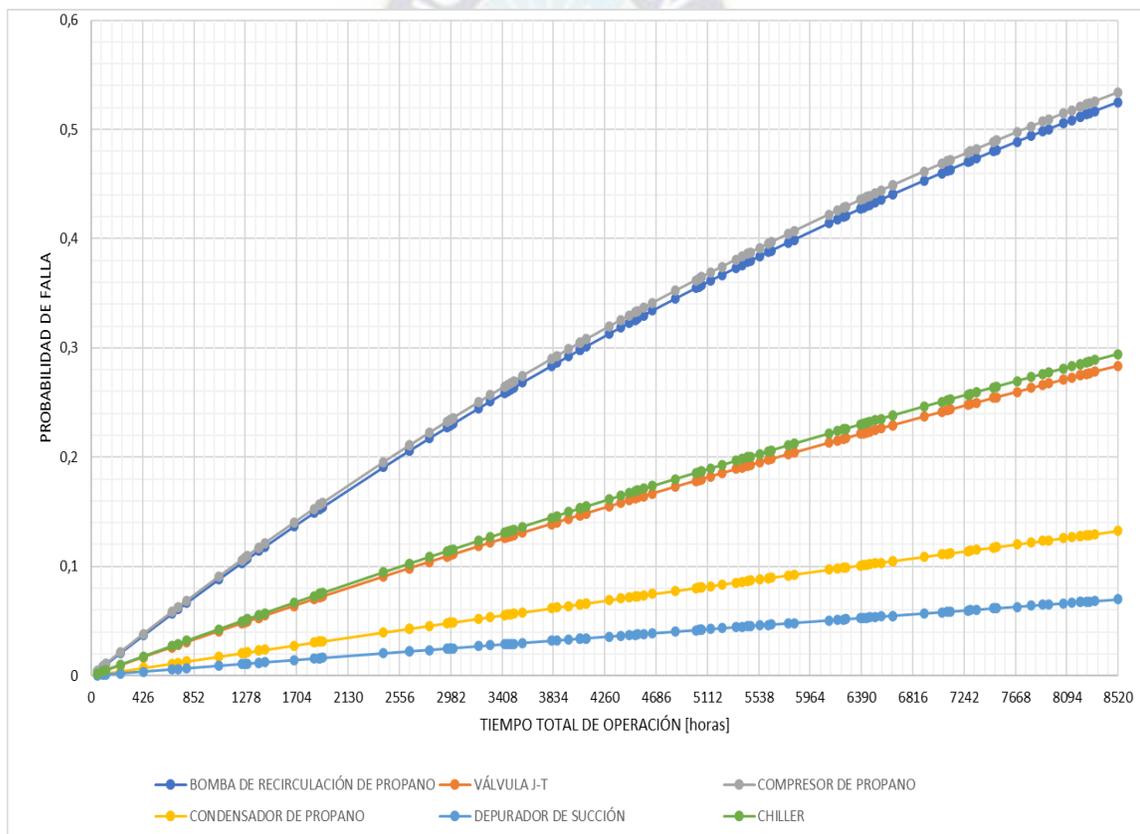
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 5-12, los equipos con mayor probabilidad de falla y menor confiabilidad son la bomba de circulación, el compresor, y el chiller. Al realizar un

gráfico Probabilidad de Falla vs. Tiempo, tomando 100 datos de tiempos aleatorios entre 0 y 8520 horas, se observa cómo la bomba y el compresor tienen mayores probabilidades de fallas con respecto a los demás equipos.

El tiempo esperado para la falla indicaría el tiempo que se puede esperar para que efectivamente ocurra una falla, nuevamente, esto ya da indica qué equipos son más confiables que otros.

Gráfica 5-2: Probabilidad vs. Tiempo de operación (horas)

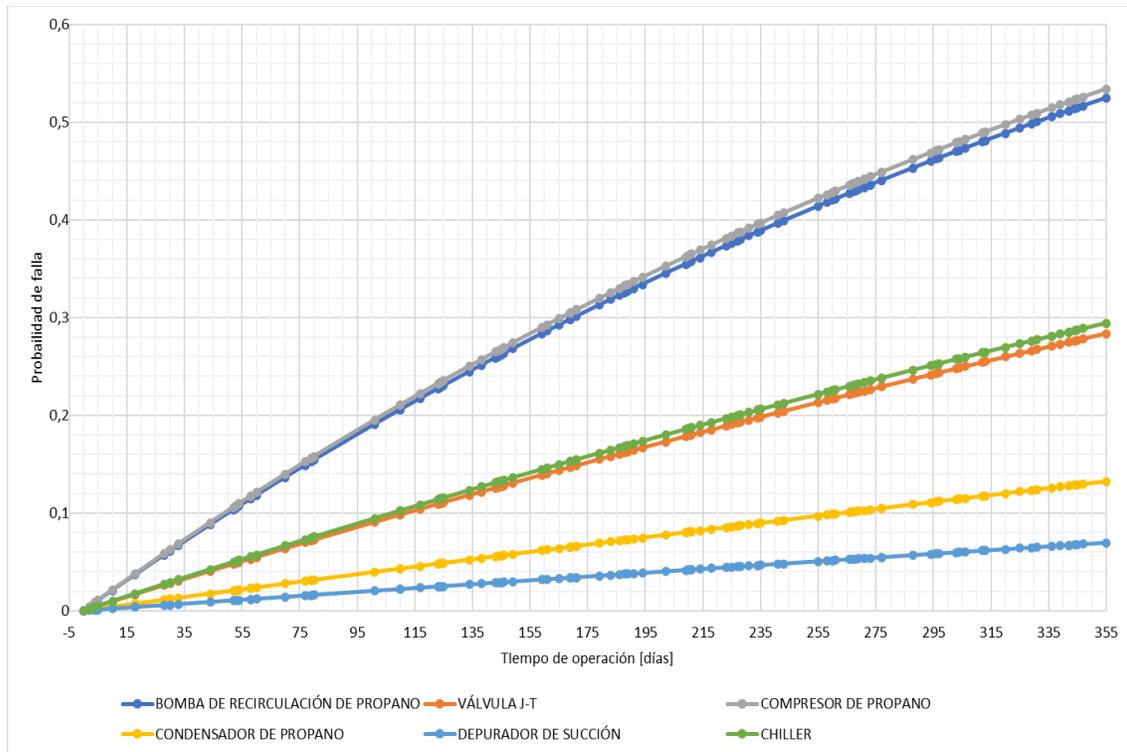


Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 5-2 muestra el incremento de la probabilidad de fallos de los equipos a través del tiempo. La válvula, depurador y condensador, son los equipos más confiables y permanecen casi constantes durante el periodo de tiempo establecido. Al concluir el año

de operación el condensador y depurador tendrán una probabilidad de falla inferior al 15%; la válvula y el chiller tendrán una probabilidad de fallas cercana al 30% y la bomba y compresor tendrán una probabilidad de falla del 54% aproximadamente.

Gráfica 5-3: Probabilidad vs. Tiempo de operación (días)



Fuente: Elaboración propia

Al convertir las horas en días, la Gráfica 5-3 muestra que tanto la bomba como el chiller comienzan a tener una probabilidad de falla alta (>20%) desde el día 110, es decir, casi 3 meses y medio después de su funcionamiento.

## b) CONFIABILIDAD DEL SISTEMA

Siguiendo este criterio y basándonos tanto en los resultados anteriores como en el diagrama de bloques elaborado (Figura 5-1), se calcula la confiabilidad total del sistema para un año según la ecuación (2-13):

$$C_{Sistema} = C_{Componente 1} \times C_{Componente 2} \times C_{Componente 3} \times \dots \times C_{Componente n}$$

Dónde:

$C_{Sistema}$  = Confiabilidad del sistema

$C_{Componente}$  = Confiabilidad de los componentes

$C_{Bomba} = 0,47521$

$C_{Compresor} = 0,46604$

$C_{Condensador} = 0,86767$

$C_{Depurador} = 0,93033$

$C_{Chiller} = 0,70564$

$C_{Válvula J-T} = 0,71625$

$$C_{Sistema} = 0,47521 \times 0,46604 \times 0,86767 \times 0,93033 \times 0,70564 \times 0,71625$$

$$C_{Sistema} = 0,09035 = 9,04\%$$

Como se puede observar, a nivel sistema, la confiabilidad es demasiado baja. Esto muestra que la dependencia del sistema respecto a cada componente es muy grande y, por ende, al fallar alguno de los componentes, se pone en riesgo la producción del sistema.

### c) DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de los equipos se utiliza la ecuación (2-18) y la ecuación (2-19):

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

También es importante calcular la indisponibilidad del sistema con la siguiente ecuación:

$$\text{Indisponibilidad} = 1 - \text{Disponibilidad}$$

Dónde:

$A_i$  = Disponibilidad inherente [adimensional]

MTBF = es el Tiempo Medio Entre Fallas [hr]

MTTR = Es el Tiempo Medio de Reparación [hr]

$\lambda$  = Tasa de Fallos

La Tabla 5-10 muestra el tiempo medio de reparación (MTTR), cada modo de fallo tiene su respectivo MTTR, sin embargo, para el cálculo de la disponibilidad se tomará el de mayor valor porque se asumen que de ocurrir dos o más fallas al mismo tiempo, estas serían arregladas simultáneamente, y porque al momento de recopilar los datos, se tomaron en cuenta los tiempos de reparación máximos.

- Bomba de circulación

$$\lambda_{bomba,actualizada} = 0,000087 \text{ [Fallas/h]}$$

$$\text{MTTR} = 96 \text{ [h]}$$

$$\text{MTBF} = \frac{1}{0,000087 \left[ \frac{\text{fallas}}{h} \right]}$$

$$\text{MTBF} = 11451,48 \text{ [h]}$$

$$A_i = \frac{11451,48}{11451,48 + 96}$$

$$A_{i \text{ bomba}} = 0,99169$$

$$I_{Bomba} = 1 - 0,99169 = 0,00831$$

En base a los resultados encontrados, se elabora la siguiente tabla:

Tabla 5-13: Cálculo de la disponibilidad de los equipos

EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/h]	TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS, MTBF [h]	TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN PARA CADA MODO DE FALLO[h]	TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN PARA EL EQUIPO, MTRR [h]	DISPONIBILIDAD INHERENTE	INDISPONIBILIDAD
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	B-100	0,000087	11451,48	77	96	0,99169	0,00831
				96			
COMPRESOR DE PROPANO	C-100	0,000090	11159,30	207	207	0,98179	0,01821
				18			
				45			
CONDENSADOR DE PROPANO	AE-100	0,000017	60021,80	6	6	0,99990	0,00010
DEPURADOR DE SUCCIÓN	S-100	0,000008	117973,21	14	14	0,99988	0,00012
CHILLER	E-100	0,000041	24436,66	40,5	40,5	0,99835	0,00165
VÁLVULA J-T	VJT-100	0,000039	25529,71	12,5	15	0,99941	0,00059

Fuente: Elaboración propia

La anterior tabla muestra los resultados obtenidos para cada equipo, como se puede ver, el compresor es el equipo que menos disponibilidad presenta debido a que el tiempo medio de reparación es más largo y su tiempo medio entre falla es más corto. Sin embargo, todos los equipos tienen valores aceptables, incluso aquellos que son menos confiables, esto se debe a que el tiempo de reparación de los modos de fallo tomados en cuenta, es muy corto.

#### d) DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA

La disponibilidad inherente del sistema es calculada de la misma manera que la confiabilidad, siguiendo el diagrama de bloques elaborado para el sistema:

$$D_{Sistema} = D_{Componente\ 1} \times D_{Componente\ 2} \times D_{Componente\ 3} \times \dots \times D_{Componente\ n}$$

Dónde:

$D_{Sistema}$  = Disponibilidad del sistema

$D_{Componente}$  = Disponibilidad de los componentes

$D_{Bomba} = 0,99169$

$D_{Compresor} = 0,98179$

$D_{Condensador} = 0,99990$

$D_{Depurador} = 0,99988$

$D_{Chiller} = 0,99835$

$D_{Válvula\ J-T} = 0,99941$

$$D_{Sistema} = 0,99169 \times 0,98179 \times 0,99990 \times 0,99988 \times 0,99835 \times 0,99941$$

$$D_{Sistema} = 0,97123 = 97,12\%$$

La disponibilidad del sistema parece tener un valor alto y aceptable para el sistema, sin embargo, este valor nos indicaría que el 2,88% del tiempo de operación, el sistema no estará disponible. Es decir, que en un año de trabajo (8520 h) se perderían 245,4 horas.

### e) MANTENIBILIDAD DE LOS EQUIPOS

Para el cálculo de la mantenibilidad de cada equipo, se utiliza la ecuación (2-24):

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{MTTR}\right)}$$

Dónde:

$t$  = Tiempo de reparación variable [h]

$MTTR$  = Tiempo medio de reparación [h]

La mantenibilidad refleja la facilidad de reparación de un equipo, por lo tanto, se espera que este sea lo más corto posible para evitar mayores pérdidas en el sistema.

El tiempo de reparación variable será de 24 horas, es decir, que se espera que un equipo sea reparado en ese tiempo.

- Bomba de circulación

$t = 24$  [h]

$MTTR = 96$  [h]

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{24}{96}\right)}$$

$$M(t)_{Bomba} = 0,22120$$

En base a los resultados encontrados, se elabora la Tabla 5-14, y tomando valores de 1 a 24 horas de reparación, se elabora la Gráfica 5-4 para todos los equipos que componen el sistema de refrigeración con propano.

Como se puede observar, para una jornada de 8 horas, la probabilidad de que estos equipos sean reparados es baja en el caso del compresor, la bomba y la válvula y alta en el caso del chiller y condensador.

Es más interesante ver este indicador en un gráfico Mantenibilidad vs Tiempo de Reparación (Gráfica 5-4), en la que se puede observar cómo incrementa la probabilidad

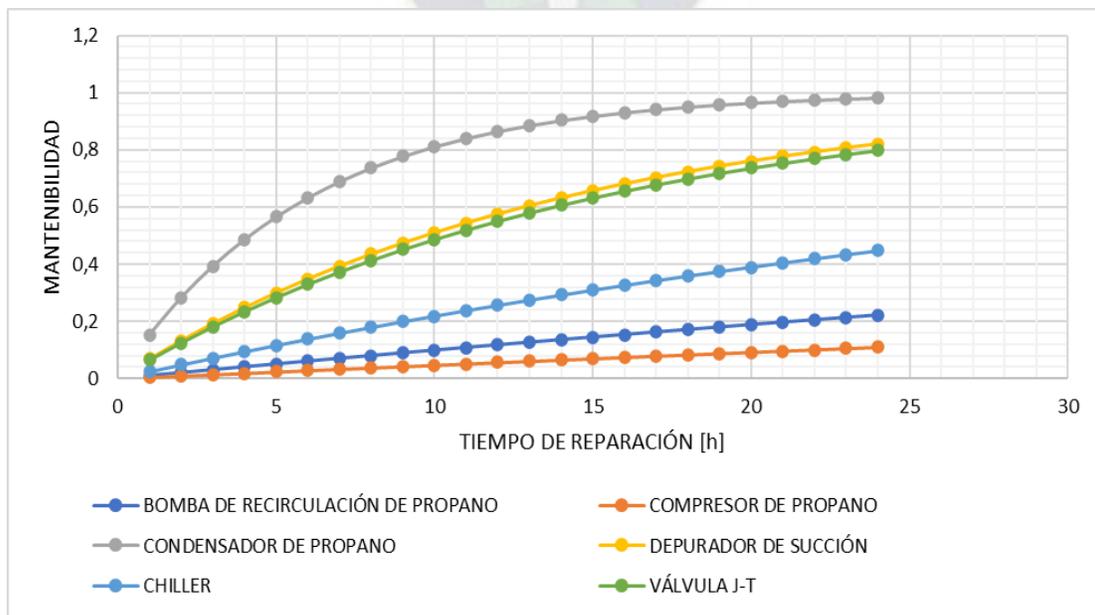
de reparación de un equipo a medida que el tiempo avanza. El compresor, la bomba y el chiller son los equipos con menos probabilidad de ser reparados en 24 horas.

Tabla 5-14: Cálculo de la mantenibilidad de los equipos

EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN, MTTR [h]	MANTENIBILIDAD
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	B-100	96	0,080
COMPRESOR DE PROPANO	C-100	207	0,038
CONDENSADOR DE PROPANO	AE-100	6	0,736
DEPURADOR DE SUCCIÓN	S-100	14	0,435
CHILLER	E-100	1,5	0,995
VÁLVULA J-T	VJT-100	15	0,413

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5-4: Mantenibilidad vs. Tiempo de Reparación



Fuente: Elaboración propia

### 5.3. FASE 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 5.3.1. JERARQUIZACIÓN DE LOS EQUIPOS

De acuerdo a los cálculos realizados, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 5-15: Resultados de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema básico de refrigeración con propano

RESULTADOS PARA EL SISTEMA BÁSICO						
EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	PROBABILIDAD DE FALLA	CONFIABILIDAD PARA [%]	DISPONIBILIDAD INHERENTE [%]	MANTENIBILIDAD PARA 24 HORAS DE REPARACIÓN [%]
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	CENTRÍFUGA	B-100	0,525	47,5%	0,9917	0,2212
COMPRESOR DE PROPANO	RECIPROCANTE	C-100	0,534	46,6%	0,9818	0,1095
CONDENSADOR DE PROPANO	AEREO ENFRIADOR	AE-100	0,132	86,8%	0,9999	0,9817
DEPURADOR DE SUCCIÓN	SCRUBBER	S-100	0,070	93,0%	0,9999	0,8199
CHILLER	INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA Y TUBOS	E-100	0,294	70,6%	0,9983	0,4471
VÁLVULA J-T	VÁLVULA GLOBO	VJT-100	0,284	71,6%	0,9994	0,7981
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO				9,0%	97,1%	

Fuente: Elaboración propia

En base a esto, y utilizando las ecuaciones (4-2) y (4-3), tenemos la criticidad de los equipos:

$$R_{falla} = P_{falla} \times C$$

Dónde:

$R_{falla}$  = Riesgo de falla

$P_{falla}$  = Probabilidad de falla

$C$  = Consecuencia

Siendo:

Sin falla = 0

Falla completa del sistema =1

Los datos de probabilidad de falla se obtienen de la Tabla 5-12.

- Bomba de circulación

$$P_{falla, bomba} = 0,52479$$

$$P_{indisponibilidad, bomba} = 0,52479$$

$$C = 1$$

$$R_{falla} = 0,52479 \times 1$$

$$R_{falla} = 0,52479$$

$$R_{indisponibilidad} = 0,52479 \times 1$$

$$R_{indisponibilidad} = 0,00831$$

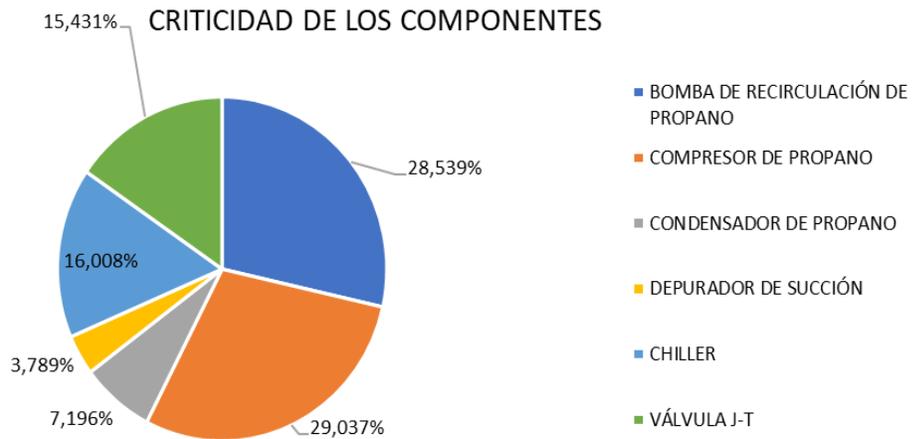
Con los resultados encontrados, se elabora la siguiente tabla:

Tabla 5-16: Cálculo de la criticidad de los equipos respecto a la confiabilidad

CRITICIDAD DE LOS COMPONENTES	PROBABILIDAD DE FALLA	CONSECUENCIA	RIESGO	RIESGO [%]
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	0,52479	1	0,525	28,54%
COMPRESOR DE PROPANO	0,53396	1	0,534	29,04%
CONDENSADOR DE PROPANO	0,13233	1	0,132	7,20%
DEPURADOR DE SUCCIÓN	0,06967	1	0,070	3,79%
CHILLER	0,29436	1	0,294	16,01%
VÁLVULA J-T	0,28375	1	0,284	15,43%
TOTAL			1,84	100,000%

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5-5: Criticidad de los componentes respecto a la confiabilidad



Fuente: Elaboración propia

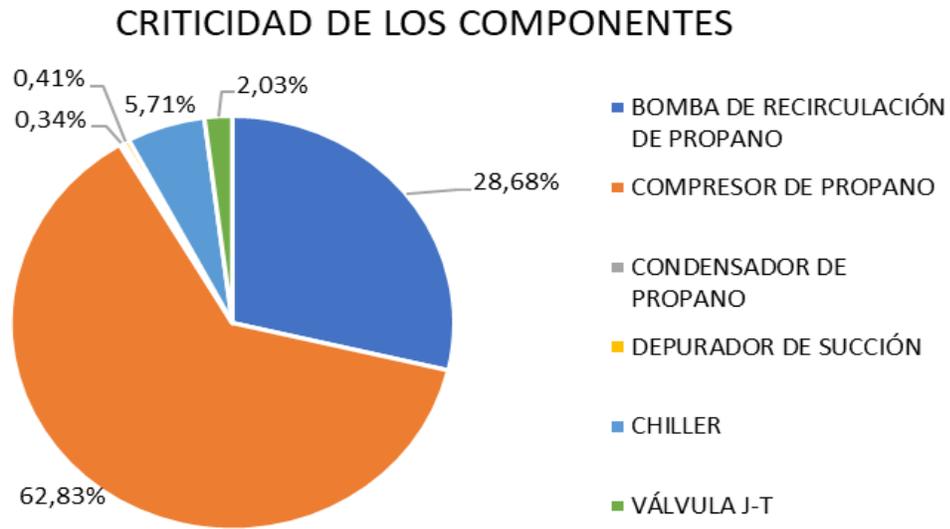
Como muestra la Gráfica 5-5, el compresor, la bomba y el chiller tienen mayor efecto en la confiabilidad del sistema.

Tabla 5-17: Cálculo de la criticidad de los equipos respecto a la disponibilidad

CRITICIDAD DE LOS COMPONENTES	INDIS-PONIBILIDAD	CONSECUENCIA	Riesgo	Riesgo [%]
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	0,00831	1	0,00831	28,68%
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	0,01821	1	0,01821	62,83%
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	0,00010	1	0,00010	0,34%
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	0,00012	1	0,00012	0,41%
<b>CHILLER</b>	0,00165	1	0,00165	5,71%
<b>VÁLVULA J-T</b>	0,00059	1	0,00059	2,03%
<b>TOTAL</b>			0,02899	100%

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5-6: Criticidad de los equipos respecto a la disponibilidad



Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 5-6 muestra que la dependencia real del sistema está sobre el compresor (principalmente) y la bomba.

### 5.3.2. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS

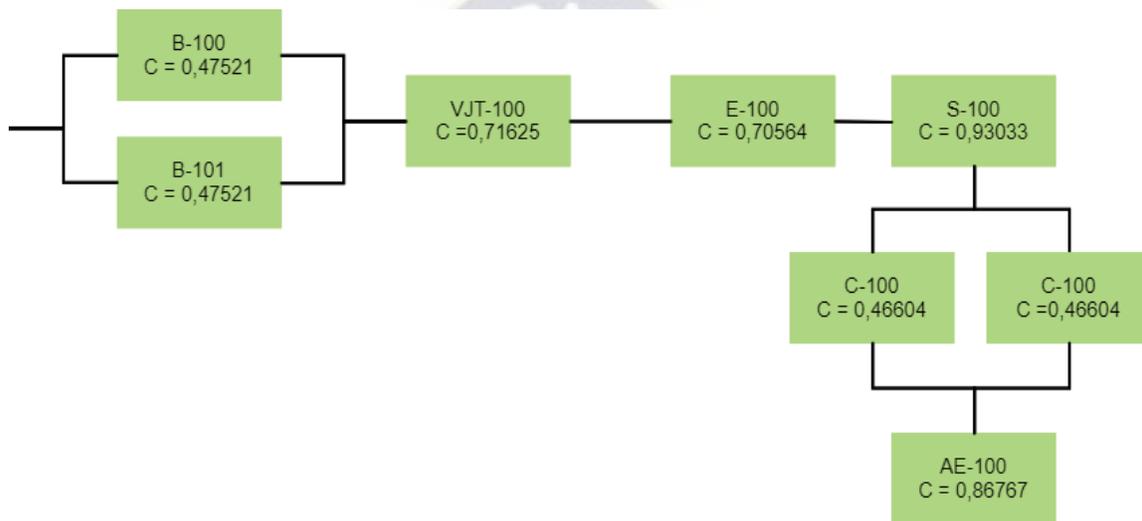
Los resultados presentados por el análisis muestran una disponibilidad alta para el sistema diseñado, pero una confiabilidad baja, esto quiere decir que a pesar que los equipos fallen, la frecuencia no es alta y el tiempo de reparación es relativamente rápido, para los equipos más esenciales. Aun así, tomando en cuenta que probablemente los costos invertidos en reparaciones y los tiempos de paros imprevistos pueden llegar a ser bastante significativos, se proponen las siguientes alternativas:

- Utilizar equipos redundantes del compresor, bomba o chiller de circulación.
- Utilizar equipos con una confiabilidad de fábrica más alta.

### 5.3.2.1. Válvula J-T y compresor redundante

Podemos incrementar de la confiabilidad y disponibilidad del sistema al colocar un equipo redundante para la válvula J-T y para el compresor, estos equipos estarían en Stand-by, con el fin de entrar en funcionamiento cuando una falla ocurra. El diagrama de bloques para este nuevo sistema sería el siguiente:

Figura 5-2: Diagrama de bloques para el sistema con redundancias



Fuente: Elaboración propia

Las confiabilidades para ambos equipos serán iguales, pues se supone que tienen las mismas características.

Con la ecuación (2-15), se calcula la confiabilidad para los equipos redundantes:

- Para el compresor:

$$C_{Sistema} = (C_{Componente 1} + C_{Componente 2}) - (C_{Componente 1} \times C_{Componente 2})$$

Obtenemos los datos de confiabilidad de la Tabla 5-12:

$$C_{Compresor} = 0,46604$$

$$C_{Sub-sistema/Compresor} = (0,46604 + 0,46604) - (0,46604 \times 0,46604)$$

$$C_{Sub-sistema/Compresor} = 0,71489$$

- Para la bomba:

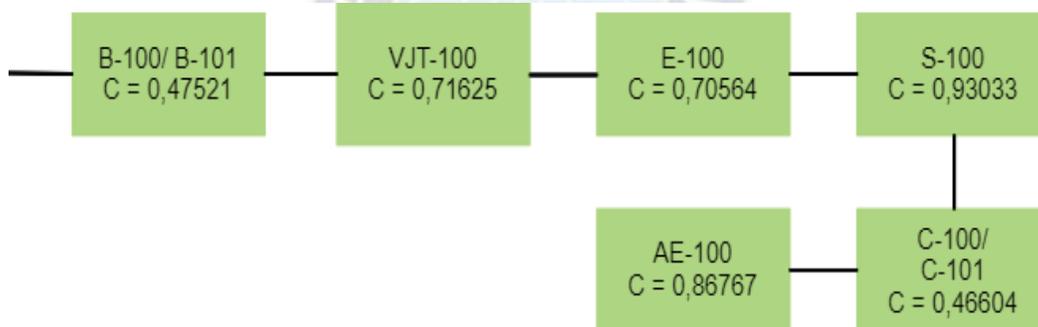
$$C_{Bomba} = 0,47521$$

$$C_{Sub-sistema/Bomba} = (0,47521 + 0,47521) - (0,47521 \times 0,47521)$$

$$C_{Sub-sistema/Bomba} = 0,72459$$

El sistema resultante será:

Figura 5-3: Diagrama de bloques para la alternativa



Fuente: Elaboración propia

De este modo, la confiabilidad para el sistema alternativo se calcula utilizando la ecuación (2-13):

$$C_{sistema} = C_{Componente 1} \times C_{Componente 2} \times C_{Componente 3} \times \dots \times C_{Componente n}$$

$$C_{Sub-sistema/Bomba} = 0,72459$$

$$C_{Condensador} = 0,86767$$

$$C_{Depurador} = 0,93033$$

$$C_{Chiller} = 0,70564$$

$$C_{Sub-sistema/Compresor} = 0,71489$$

$$C_{Válvula J-T} = 0,71625$$

$$C_{Sistema} = 0,72459 \times 0,86767 \times 0,93033 \times 0,70564 \times 0,71489 \times 0,71625$$

$$C_{Sistema} = \mathbf{0,21133 = 21,13\%}$$

Como se puede notar, existe un incremento notable respecto a la confiabilidad del sistema anterior (9,03%).

De la misma manera, se realizan los cálculos para la nueva disponibilidad del sistema, tomando datos de la Tabla 5-13:

Disponibilidad para el compresor:

$$D_{Compresor} = 0,98179$$

$$D_{Sub-sistema/compresor} = (0,981788 + 0,981788) - (0,981788 \times 0,981788)$$

$$D_{Sub-sistema/compresor} = \mathbf{0,99967}$$

Para la bomba:

$$D_{Bomba} = 0,99169$$

$$D_{Sub-sistema/bomba} = (0,99169 + 0,99169) - (0,99169 \times 0,99169)$$

$$D_{Sub-sistema/bomba} = \mathbf{0,99993}$$

Calculando la disponibilidad total del sistema alternativo:

$$D_{Sub-sistema/bomba} = 0,99993$$

$$D_{Sub-sistema/compresor} = 0,99967$$

$$D_{Condensador} = 0,99990$$

$$D_{Depurador} = 0,99988$$

$$D_{Chiller} = 0,99835$$

$$D_{Válvula J-T} = 0,99941$$

$$D_{Sistema} = 0,99993 \times 0,99967 \times 0,99990 \times 0,99988 \times 0,99835 \times 0,99941$$

$$C_{Sistema} = 0,99714 = 99,71\%$$

El resultado también muestra un incremento en la disponibilidad.

La mantenibilidad se mantendrá constante ya que no depende de la configuración funcional del sistema.

Los resultados para esta alterativa son:

Tabla 5-18: Resultado para el sistema alternativo

RESULTADOS PARA EL SISTEMA ALTERNATIVO						
EQUIPO	TIPO DE EQUIPO	IDENTIFICACIÓN O CODIFICACIÓN	PROBABILIDAD DE FALLA	CONFIABILIDAD [%]	DISPONIBILIDAD INHERENTE [%]	MANTENIBILIDAD PARA 24 HORAS REPARACIÓN [%]
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	CENTRÍFUGA	B-100	0,275	72,5%	0,9999	0,0800
COMPRESOR DE PROPANO	RECIPROCANTE	C-100	0,285	71,5%	0,9997	0,0379
CONDENSADOR DE PROPANO	AEREO ENFRIADOR	AE-100	0,132	86,8%	0,9999	0,7364
DEPURADOR DE SUCCIÓN	SCRUBBER	S-100	0,070	93,0%	0,9999	0,4353
CHILLER	INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA Y TUBOS	E-100	0,294	70,6%	0,9983	0,1792
VÁLVULA J-T	VÁLVULA GLOBO	VJT-100	0,284	71,6%	0,9994	0,4134
SISTEMA DE REFRIGERANCIÓN CON PROPANO				21,1%	99,7%	

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.3. ANÁLISIS DEL COSTO DE CICLO DE VIDA

A continuación, se muestran los costos estimados para el sistema básico de refrigeración con propano:

- **Costos Capex**

Tabla 5-19: Costos Capex para el sistema de refrigeración con propano

<b>COSTOS CAPEX</b>			
<b>COSTOS DE ADQUISICIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$]</b>	<b>COSTO TOTAL [\$]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	\$4.900,0	\$4.900,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	\$902.000,0	\$902.000,0
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$57.500,0	\$57.500,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$15.600,0	\$15.600,0
<b>CHILLER</b>	1	\$29.000,0	\$29.000,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$2.000,0	\$2.000,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$6.000,0	\$6.000,0
<b>COSTO TOTAL DE ADQUISICIÓN [\$]</b>			<b>\$1.017.000,00</b>
<b>COSTOS DE INSTALACIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$]</b>	<b>COSTO TOTAL [\$]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	\$34.500,0	\$34.500,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	\$1.038.300,0	\$1.038.300,0
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$104.300,0	\$104.300,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$113.800,0	\$113.800,0
<b>CHILLER</b>	1	\$185.900,0	\$185.900,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$1.200,0	\$1.200,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$20.000,0	\$20.000,0
<b>TOTAL [\$]</b>			<b>\$1.498.000,0</b>
<b>TOTAL CAPEX [\$]</b>			<b>\$2.515.000,0</b>

Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones del simulador Aspen Hysys e información recopilada

- **Costos opex**

Los costos de operación también son estimaciones basadas en información recopilada de la bibliografía estudiada y gracias a los resultados obtenidos con el simulador aspen hysys. Los costos de mantenimiento son el 3% de los costos de adquisición e instalación de los equipos.

Tabla 5-20: Costos Opex

<b>COSTOS OPEX</b>				
<b>COSTOS DE ENERGÍA</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [Bs /kW/h]</b>	<b>CONSUMO DE ENERGÍA [Kw/h]</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL [\$/AÑO]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	0,4	0,26	\$132,9
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	0,4	2810,50	\$1.414.941,4
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	0,4	734,00	\$369.531,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	0,4	0,00	\$0,0
<b>CHILLER</b>	1	0,4	0,00	\$0,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	0,4	0,00	\$0,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	0,4	0,00	\$0,0
<b>COSTO TOTAL DE ENERGÍA [\$/AÑO]</b>				<b>\$1.784.605,3</b>
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$/AÑO]</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL [\$/AÑO]</b>	
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	\$2.000,0	\$2.000,0	
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	\$12.000,0	\$12.000,0	
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$10.000,0	\$10.000,0	
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$5.000,0	\$5.000,0	
<b>CHILLER</b>	1	\$7.000,0	\$7.000,0	
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$7.000,0	\$7.000,0	
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$1.000,0	\$1.000,0	
<b>COSTO TOTAL DE OPERACIÓN [\$/AÑO]</b>			<b>\$44.000,0</b>	
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$/AÑO]</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL [\$/AÑO]</b>	
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	\$1.182,0	\$1.182,0	
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	\$58.209,0	\$58.209,0	
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$4.854,0	\$4.854,0	
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$3.882,0	\$3.882,0	
<b>CHILLER</b>	1	\$6.447,0	\$6.447,0	
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$96,0	\$96,0	
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$780,0	\$780,0	
<b>MANO DE OBRA</b>	1	\$5.000,0	\$5.000,0	
<b>COSTO TOTAL DE MANTENIMIENTO [\$/AÑO]</b>			<b>\$80.450,0</b>	
<b>COSTO POR PENALIZACIÓN [\$/h]</b>			<b>\$100,0</b>	
<b>COSTO TOTAL OPEX [\$/AÑO]</b>				<b>\$1.909.055,3</b>

Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones del simulador Aspen HYSYS e información

recopilada

- **Costo por baja confiabilidad**
- Para el cálculo de del costo por baja confiabilidad se utiliza la ecuación (4-4) y los datos de costos de la y los datos de frecuencia de falla y tiempo de reparación de la tabla Tabla 5-13:

$$C_{BC} = \lambda \times (TPFS \times (CPP + CP) + CD_{\lambda})$$

$C_{BC}$  = Costo por baja confiabilidad [\$]

$\lambda$  = Frecuencia o tasa de falla [fallas/año]

$TPFS$  = Tiempo promedio fuera de servicio [h/falla] = MTTR

$CPP$  = Costos de penalización [\$/hora]

$CP$  = Costos por pérdida de producción [\$/hora]

$CD_{\lambda}$  = Costos directos por falla [\$]

Para el costo por pérdida de producción, se toma en cuenta el precio de venta de gas natural a Brasil que, según el Banco Central de Bolivia, para el 20 de diciembre de 2020 era de 3,7309 \$/MSCF.

Tabla 5-21: Costo por pérdida de producción

PRECIO DE VENTA DEL GAS NATURAL [\$/MSCF]	CAUDAL POR DÍA [MMSCFD]	REDUCCIÓN DEL FLUJO [MSCF/h]	COSTO POR PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN [\$/h]
3,7309	35	1458,3	5440,9

Fuente: Elaboración propia con datos de diseños del sistema de refrigeración con propano y del Banco Central de Bolivia

Para los costos directos por falla, se toman en cuenta los datos de la Tabla 5-20. Los costos de mano de obra anual se dividen entre 8 horas por 30 días de trabajo; los costos de repuestos y equipos para las reparaciones se estiman como un 3% del costo de adquisición de los equipos. La siguiente tabla resume los costos directos por fallas de los equipos:

Tabla 5-22: Costos directos por fallas

	TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN, MTTR [h]	COSTO DE MANO DE OBRA [\$/H]	COSTO DE REPARACIÓN [\\$]	REPUESTOS Y EQUIPOS	TOTAL [\\$]
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	96	20,8	2000,0	147	2147,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	207	20,8	4312,5	27060	31372,5
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	6	20,8	125,0	1725	1850,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	14	20,8	291,7	468	759,7
<b>CHILLER</b>	40,5	20,8	843,8	870	1713,8
<b>VÁLVULA J-T</b>	15	20,8	312,5	60	372,5

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtienen los costos por baja confiabilidad para todos los equipos y en total:

Tabla 5-23: Cálculo de los costos por baja confiabilidad

EQUIPO	ID.	$CD_{\lambda}$ [\\$]	CP [\$/h]	CPP [\$/h]	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/h]	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/año]	MTTR [h]	$C_{BC}$ [\$/AÑO]
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	B-100	2147,0	\$5.440,9	100	0,000087	0,744009	96	\$397.355,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	C-100	31372,5	\$5.440,9	100	0,000090	0,763489	207	\$899.647,6
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	AE-100	1850,0	\$5.440,9	100	0,000017	0,141948	6	\$4.981,7
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	S-100	759,7	\$5.440,9	100	0,000008	0,072220	14	\$5.657,1
<b>CHILLER</b>	E-100	1713,8	\$5.440,9	100	0,000041	0,348656	40,5	\$78.838,2
<b>VÁLVULA J-T</b>	VJT-100	372,5	\$5.440,9	100	0,000039	0,333729	15	\$27.861,7
<b>TOTAL [\\$]</b>								\$1.414.341,4

Fuente: Elaboración propia en base a la Tabla 5-13 y a información recopilada de bibliografía

- **Cálculo del costo actual neto y costo anual equivalente**

El costo por baja confiabilidad debe estar considerado dentro de los costos totales de operación:

$$C_{OPEX/T} = C_{OPEX} + C_{BC}$$

$$C_{OPEX/T} = \$1.909.055,3 + \$1.414.341,4$$

$$C_{OPEX/T} = \$3.323.396,7$$

Para el cálculo del costo anual equivalente utilizamos las ecuaciones (2-26), (2-27), (2-28), (2-29) y los datos de la:

$$CAN = A + \sum_{i=1}^t C_{OPEX/T} * r^t - R * r^t$$

$$r = \frac{1}{1+i}$$

$$CAE = CAN * FRC$$

$$FRC = \frac{i * (1+i)^t}{(1+i)^n - 1}$$

Dónde:

$CAN$  = Costo actual neto [\$]

$A$  = Costo de adquisición [\$]

$R$  = Valor de reventa [\$]

$r$  = Tasa de interés de retorno

$i$  = Tasa de descuento

$t$  = Periodo [años]

$C_{Opex}$  = Costos OPEX

$CAE$  = Costo actual equivalente [\$]

FRC = Factor de recuperación de capital

- La tasa de descuento es de 12%, considerando el Anexo del artículo 22 del DS N° 24051 sobre las depreciaciones del activo fijo.
- El precio de reventa es una estimación lineal de la depreciación de los activos.

Tabla 5-24: Datos para el cálculo del costo anual equivalente para el sistema básico

<b>TOTAL CAPEX [\$]</b>	\$2.515.000,0
<b>COSTO TOTAL OPEX [\$/AÑO]</b>	\$3.323.396,7
<b>TASA DE DESCUENTO</b>	12%
<b>TIEMPO DE CICLO DE VIDA [AÑOS]</b>	8

Fuente: Elaboración propia en base a las Tabla 5-19, Tabla 5-23 y Tabla 5-20

- Cálculo para el primer año con datos de la Tabla 5-24:

$$r = \frac{1}{1+i} = \frac{1}{1+0,12} = \mathbf{0,893}$$

$$R = C_{capex} - \frac{C_{capex}}{\text{último año}} * 1er \text{ año} = \$2.515.000,0 - \frac{\$2.515.000,0}{8} * 1$$

$$R = \$2.200.625,0$$

$$CAN = A + \sum_{i=1}^t C_{OPEX/T} * r^t - R * r^t$$

$$CAN_1 = \$2.515.000,0 + \$3.323.396,7 * 0.893^1 - \$2.200.625,0 * 0.893^1$$

$$\mathbf{CAN_1 = \$3.517.635,1}$$

$$FRC = \frac{i * (1+i)^t}{(1+i)^n - 1} = \frac{0,12 * (1+0,12)^1}{(1+0,12)^1 - 1}$$

$$\mathbf{FRC = 1,120}$$

$$CAE = CAN * FRC = \$3.517.635,1 * 1,120$$

$$CAE = \$3.939.751,4$$

La siguiente tabla resume el cálculo de CAN y CAE para el sistema básico de refrigeración con propano.

Tabla 5-25: Cálculo del costo anual equivalente para el sistema básico

AÑO	COSTO TOTAL OPEX [\$/AÑO]	$r^t$	$C_{OPEX/T} * r^t$	$\sum_{i=1}^t C_{OPEX/T} * r^t$	$R * r^t$	CAN [\$]	FRC	CAE [\$]
1	\$3.323.396,7	\$0,893	\$2.967.793,3	\$2.967.793,3	\$1.965.158,1	\$3.517.635,1	1,120	\$3.939.751,4
2	\$3.323.396,7	\$0,797	\$2.648.747,2	\$5.616.540,5	\$1.503.341,3	\$6.628.199,2	0,592	\$3.923.893,9
3	\$3.323.396,7	\$0,712	\$2.366.258,5	\$7.982.798,9	\$1.119.175,0	\$9.378.623,9	0,416	\$3.901.507,6
4	\$3.323.396,7	\$0,636	\$2.113.680,3	\$10.096.479,2	\$799.770,0	\$11.811.709,2	0,329	\$3.886.052,3
5	\$3.323.396,7	\$0,567	\$1.884.365,9	\$11.980.845,2	\$534.751,9	\$13.961.093,3	0,277	\$3.867.222,8
6	\$3.323.396,7	\$0,507	\$1.684.962,1	\$13.665.807,3	\$318.776,3	\$15.862.031,1	0,243	\$3.854.473,6
7	\$3.323.396,7	\$0,452	\$1.502.175,3	\$15.167.982,6	\$142.097,5	\$17.540.885,1	0,219	\$3.841.453,8
8	\$3.323.396,7	\$0,404	\$1.342.652,3	\$16.510.634,9	\$0,0	\$19.025.634,9	0,201	\$3.824.152,6

Fuente: Elaboración propia

El cálculo para el sistema alternativo será similar, pero se deben considerar los costos CAPEX y OPEX de una bomba y un compresor adicionales (Ver Anexo). Además, que en el cálculo por del ciclo de vida, el tiempo fuera de servicio se asume cero para la bomba y compresor, pues el equipo en stand-by supliría el trabajo del equipo en operación cuando este falle.

Tabla 5-26: Datos para el costo anual equivalente del sistema alternativo

<b>TOTAL CAPEX [\$]</b>	\$4.496.700,0
<b>COSTO TOTAL OPEX [\$/AÑO]</b>	\$2.077.072,6

<b>TASA DE DESCUENTO</b>	12%
<b>TIEMPO DE CICLO DE VIDA [AÑOS]</b>	8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-27: Cálculo del costo anual equivalente para el sistema alternativo

AÑO	COSTO TOTAL OPEX [\$/AÑO]	$r^t$	$C_{OPEX/T} * r^t$	$\sum_{i=1}^t C_{OPEX/T} * r^t$	$R * r^t$	CAN [\$]	FRC	CAE [\$]
1	\$2.077.072,6	\$0,893	\$1.854.825,9	\$1.854.825,9	\$3.513.609,0	\$2.837.916,9	1,120	\$3.178.466,9
2	\$2.077.072,6	\$0,797	\$1.655.426,9	\$3.510.252,8	\$2.687.902,4	\$5.319.050,3	0,592	\$3.148.877,8
3	\$2.077.072,6	\$0,712	\$1.478.875,7	\$4.989.128,5	\$2.001.031,5	\$7.484.797,0	0,416	\$3.113.675,5
4	\$2.077.072,6	\$0,636	\$1.321.018,2	\$6.310.146,7	\$1.429.950,6	\$9.376.896,1	0,329	\$3.084.998,8
5	\$2.077.072,6	\$0,567	\$1.177.700,2	\$7.487.846,9	\$956.110,8	\$11.028.436,0	0,277	\$3.054.876,8
6	\$2.077.072,6	\$0,507	\$1.053.075,8	\$8.540.922,7	\$569.956,7	\$12.467.666,0	0,243	\$3.029.642,8
7	\$2.077.072,6	\$0,452	\$938.836,8	\$9.479.759,5	\$254.063,6	\$13.722.396,0	0,219	\$3.005.204,7
8	\$2.077.072,6	\$0,404	\$839.137,3	\$10.318.896,9	\$0,0	\$14.815.596,9	0,201	\$2.977.935,0

Fuente: Elaboración propia

#### 5.3.4. COMPARACIÓN ENTRE ALTERNATIVAS

Para comparar los resultados encontrados al realizar el análisis RAM, se elabora la siguiente tabla:

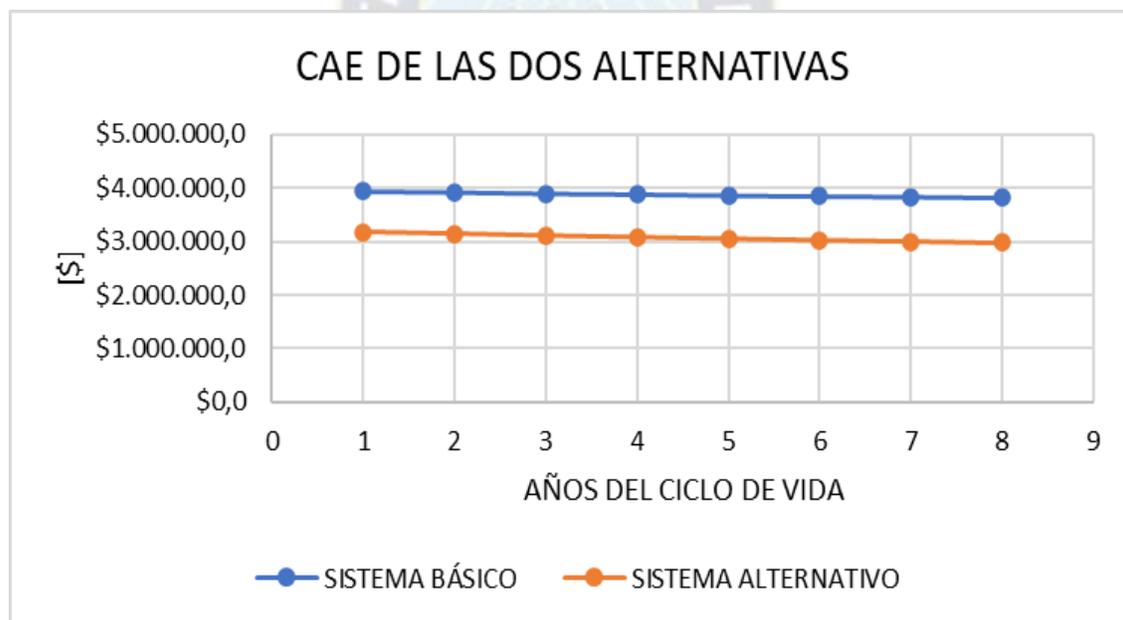
Tabla 5-28: Tabla de comparación entre sistemas

PARÁMETRO DE COMPARACIÓN	SISTEMA BÁSICO	SISTEMA ALTERNATIVO	DIFERENCIA
<b>NÚMERO DE COMPONENTES</b>	6	8	2
<b>CONFIABILIDAD [%]</b>	9,0%	21,1%	12%

<b>DISPONIBILIDAD [%]</b>	97,1%	99,7%	2,6%
<b>COSTO DE INVERSIÓN INICIAL (CAPEX) [\$]</b>	\$2.515.000,0	\$4.496.700,0	78,8%
<b>COSTOS DE OPERACIÓN [\$/AÑO]</b>	\$3.323.396,7	\$2.077.072,6	37,5%
<b>COSTOS POR BAJA CONFIABILIDAD [\$/AÑO]</b>	\$1.414.341,4	\$169.197,3	88,0%
<b>CAN INICIAL [\$/AÑO]</b>	\$3.517.635,1	\$2.837.916,9	19,3%
<b>CAN DESPUÉS DE 8 AÑOS [\$/AÑO]</b>	\$19.025.634,9	\$14.815.596,9	22,1%
<b>CAE INICIAL [\$/AÑO]</b>	\$3.939.751,4	\$3.178.466,9	19,3%
<b>CAE DESPUÉS DE 8 AÑOS [\$/AÑO]</b>	\$3.824.152,6	\$2.977.935,0	22,1%

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5-7: Costo anual equivalente de las alternativas



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 5-28, ambas alternativas presentan sus ventajas y desventajas. Por un lado, el sistema básico tiene una confiabilidad muy baja, pero la inversión inicial de capital es menor que el sistema alternativo, el cual presenta una confiabilidad y disponibilidad mayor. Esto repercute en el costo actual neto (CAN), en

el sistema básico, se tiene una pérdida por baja confiabilidad de \$1.414.341,4, mientras que en sistema alternativo es de tan sólo \$169.197,3.

La Gráfica 5-7 muestra el costo anualizado para cada alternativa, si bien en ambas disminuye, es el sistema alternativo la opción que presenta menor costo.



## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

El presente proyecto de grado tiene como objetivo principal la elaboración de un modelo metodológico para la realización de un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad en la etapa de ingeniería conceptual de un proyecto en la industria del gas y petróleo. Mediante la aplicación del modelo propuesto se puede realizar la comparación entre dos opciones de configuración de diseño de un mismo sistema, cuyo resultado mostró el pronóstico sobre las ventajas económicas y de confiabilidad y disponibilidad de una alternativa sobre otra. Es por eso, que en este capítulo se busca cuantificar el indicador económico conocido como beneficio/costo de la aplicación del proyecto.

### 6.1. BENEFICIOS

Después de haber realizado el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad al sistema de refrigeración con propano, se encontró que al cabo de 8 años los costos del sistema básico y de sistema alternativo (una bomba y un compresor adicional) son respectivamente:

$$CAN_{básico} = \$19.025.634,9$$

$$CAN_{alternativo} = \$14.815.596,9$$

Esto debido a la diferencia existente entre los costos por baja confiabilidad, donde el sistema básico presenta menor confiabilidad.

Por lo tanto, el beneficio puede ser estimado como la diferencia de costos CAN entre ambas opciones, es decir el beneficio de seleccionar el sistema que represente un menor costo durante el ciclo de vida del proyecto:

$$B = \$19.025.634,9 - \$14.815.596,9$$

$$B = \$4.210.038,1$$

## 6.2. COSTOS

Los costos involucrados en este proyecto están asociados a:

- Costo de información. -

Consiste en el costo de obtención de datos genéricos sobre confiabilidad, en este caso, se usa la fuente de datos OREDA (el precio para acceder a la fuente de datos es anual).

$$C_{OREDA} = \$ 8470,3$$

- Costo de personal. –

Para obtener datos basados en la experiencia de expertos, y lograr un análisis más confiable, se debe trabajar con un personal multidisciplinario calificado: Ingeniero en procesos, ing, mecánico, técnico de operación y gerente de proyecto. Esperando que el desarrollo del proyecto tome un año en desarrollarse, el costo de personal será:

$$C_{personal} = 5 * 12 * \$ 5000$$

$$C_{personal} = \$ 300.000$$

- Costo de los equipos adicionales. -

Habiéndose elegido el sistema alternativo, se incurre en una inversión adicional para cubrir los gastos de compra, instalación y operación, tal y como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 6-1: Costos adicionales por implementar el proyecto

	<b>COSTO TOTAL ANUAL [\$/AÑO]</b>	<b>COSTO TOTAL [\$/]</b>
<b>COSTOS DE ADQUISICIÓN</b>		
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	-	\$4.900,0
COMPRESOR DE PROPANO	-	\$902.000,0
<b>COSTOS DE INSTALACIÓN</b>		
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	-	\$34.500,0
COMPRESOR DE PROPANO	-	\$1.038.300,0
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>		
BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO	1182	\$9.456,0
COMPRESOR DE PROPANO	58209	\$465.672,0
<b>COSTOS ADICIONALES TOTALES</b>		<b>\$2.454.828,0</b>

Fuente: Elaboración propia

- Costo total. -

Es la suma de todos los costos en los que se incurre al aplicar el modelo metodológico para la realización del análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad:

$$C_{total} = C_{OREDA} + C_{personal} + C_{adicional}$$

$$C_{total} = \$ 8.470,3 + \$ 300.000 + \$2.454.828,0$$

$$C_{total} = \$2.763.298,3$$

### 6.3. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO

“El índice beneficio/costo (I B/C), también conocido como relación beneficio/costo compara directamente, los beneficios y los costos de un proyecto para definir su viabilidad. Para calcular la relación B/C se halla primero la suma de todos los beneficios descontados, traídos al presente, y se divide sobre la suma de los costos también descontados.” (Santa Cruz, 2017)

La fórmula básica para calcular esta relación es:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios netos}}{\text{Costos de inversión}}$$

Para saber si un proyecto es viable bajo este enfoque, se debe considerar la comparación de la relación B/C hallada con 1:

- Si  $B/C > 1$ , esto indica que los beneficios son mayores a los costos. En consecuencia, el proyecto debe ser considerado.
- $B/C = 1$ , significa que los beneficios igualan a los costos. No hay ganancias.
- $B/C < 1$ , muestra que los costos superan a los beneficios. En consecuencia, el proyecto no debe ser considerado.

Con los resultados obtenidos en los puntos anteriores, procedemos al cálculo de la relación beneficio/ costo:

$$\frac{B}{C} = \frac{\$4.210.038,1}{\$2.763.298,3}$$

$$\frac{B}{C} = 1,52$$

Como se puede observar, el resultado es positivo, y el proyecto es beneficioso al ser aplicado al diseño del sistema de refrigeración con propano.

## **CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. CONCLUSIONES**

- Se logró diseñar un modelo metodológico básico para la realización de un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (análisis RAM) en la etapa de ingeniería conceptual para proyectos de la industria de gas y petróleo. Este modelo toma consideraciones importantes como considerar los modos de fallas independientes y considerar la tasa de fallos constante en el tiempo, esto con el fin de simplificar el análisis y sustentado en que durante la etapa de ingeniería conceptual los componentes de un sistema se analizan a nivel equipo y no al nivel de las partes de cada componente, esto queda respaldado por la bibliografía consultada.
- Se logró estudiar las técnicas y métodos involucrados en el análisis RAM y conocer sus alcances, limitaciones e importancia. Gracias a ello, se concluye que el análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad puede llegar a ser una herramienta importante de pronóstico para la elaboración de proyectos en la industria petrolera, la cual involucra grandes inversiones y decisiones que no pueden ser tomadas a la ligera.
- Se logró estructurar un procedimiento sencillo y entendible, que permita entender y realizar el análisis RAM, el cual consta de 3 fases: Sistema bajo estudio, obtención y tratamiento de datos y análisis de los resultados. Cada fase engloba varios pasos a seguir que van desde el diseño del sistema hasta el análisis del costo de ciclo de vida del proyecto.
- Se logró ejemplificar la aplicación de dicho análisis en un sistema de refrigeración de propano de una planta Dew Point para un ciclo de vida de ocho años, con ayuda de

datos genéricos obtenidos de la base de datos OREDA, en la etapa de diseño conceptual. Como resultado general, se obtuvo una alternativa al diseño inicial, cuyo propósito es mejorar el sistema básico a nivel confiabilidad y minimizar los costos por baja confiabilidad durante el ciclo de vida del proyecto. Todo el proyecto fue realizado con ayuda de programas de fácil accesibilidad como ser Aspen Hysys y Excel, siendo este último el principal.

- Las ventajas de aplicar este proyecto en la etapa de ingeniería conceptual de un proyecto en la industria petrolera son:
  - Pronóstico de los costos por baja confiabilidad de los sistemas diseñados.
  - Presentación y selección de alternativas que permitan mejorar el diseño inicial.
  - Sirve para justificar económicamente la compra de equipos.
  - Servirá para la elaboración de planes de mantenimiento.
  - Sirve como antecedente para realizar el mismo análisis o estudios parecidos durante la etapa operativa del proyecto.

Las desventajas del proyecto son:

- Entre más complejo sea el sistema, más laborioso es realizar el análisis.
- Se necesita capacitación para el personal que lo va a realizar
- Como conclusión final, se logró identificar el rol que cumple el ingeniero en procesos en el diseño de sistemas y en la realización de este tipo de análisis, debido a su amplio conocimiento sobre los sistemas.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

- Debido a que la elaboración de un análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad es un proceso largo, bastante detallado, y que implica el análisis

de una gran cantidad de datos se sugiere el uso de software especializado por dos razones especialmente, la primera es que simplificaría la evaluación de varias alternativas al mismo tiempo, y la segunda es que permite mejorar el análisis de datos tomando en cuenta fallas parciales, por ejemplo.

- Se recomienda no depender únicamente de datos genéricos, pues la utilización de datos reales ayuda al análisis a acercarse más a la realidad.
- El modelo metodológico propuesto puede ser usado como una base para el desarrollo de otros sistemas, pero a medida que estos se tornan más complejos, este debe ser reestructurado, todo dependiendo de las necesidades de quienes realizan el análisis.



## BIBLIOGRAFÍA

(n.d.).

Al-Douri, A., Kazantzi, V., Eljack, F. T., El-Halwagi, M. M., & Sam, M. M. (2020).

Mitigation of operational failures via an economic framework of reliability, availability, and maintainability (RAM) during conceptual design.

*Journal of Loss Prevention in the Process Industries.*

Borgez, V. (2015). La gestión de las inversiones y el ciclo de vida de los activos.

*Petrotecnia*, 74-92.

Calvo, E. A., & Sierra, C. (2017). *Técnicas de mantenimiento en instalaciones mineras.*

Santander.

Casilla, A. (2021). Análisis del Costo de Ciclo de Vida. Lima, Perú.

Fuenmayor, E. (2019). Selección de un activo físico considerando sus costos en el ciclo

de vida. *Mantenimiento en latinoamérica*, 10-15.

Goel, H. (2004). Integrating Reliability, Availability and Maintainability (RAM) in

Conceptual Process Design. *Tesis Doctoral, Delft University*. Holanda.

Gomez de la Vega, H., Valbuena, C. G., & Yañez Medina, M. (2004). *Ingeniería de*

*Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo*. Reliability and Risk

Management, S. A.

GTB. (2005). Memoria Anual.

HIDROCARBUROS, A. N. (n.d.). *ANEXO 4: CALIDAD DEL GAS NATURAL.*

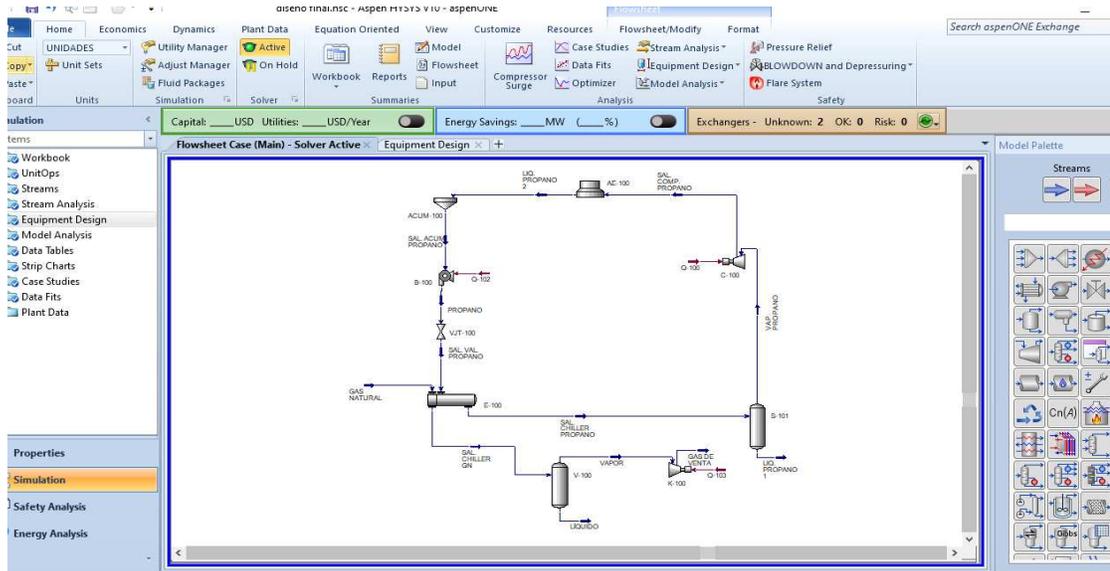
- IeeeXplore*. (n.d.). From <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=24>
- ISO 14224:2016 (Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad u mantenimiento de equipos)*. (2016).
- Kidnay, A. J., & Parrish, W. R. (2006). *Fundamentals of Natural Gas Processing*. Florida: Taylor & Francis Group.
- Modarres, M., Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis*. Nueva York: Marcel Decker, Inc.
- Moubray, J. (2010). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. Industrial Press Inc.
- Munday, A. J., & Farrar, R. A. (1979). *Engineering Data Book*. McMillan International Higher Education.
- Parra Márquez, C., & Crespo Márquez, A. (2019). *Técnicas de análisis de coste de ciclo de vida, utilizadas para justificar la aplicación de herramientas de optimización de mantenimiento, propuestas para la industria 4.0. Cso de estudio: Sectos oil and gas*. INGEMAN, Sevilla.
- Roca Álves, J. C. (2016). *Informe operacional de la Planta Dewpoint Margarita-Huacaya*. Tarija.
- Romero Barrios, M. T., Agüero López, M. Á., & Rojas Monsalve, E. A. (2014). Experiencias en el Desarrollo de Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (Análisis RAM).

- Santa Cruz, E. (2017, Enero 24). *ESAN*, El índice beneficio/costo en las finanzas corporativas. Retrieved 12 29, 2021 from <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/el-indice-beneficiocosto-en-las-finanzas-corporativas/>
- Saraswat, S., & Yadava, G. (2008). Una descripción general de la ingeniería de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y compatibilidad (RAMS). *International Journal of Quality & Reliability Management*, 330-344.
- Schlumberger. (n.d.). *Oilfield Glossary*. From <https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/j/joule-thomson>
- SINTEF. (2009). *OREDA (Offshore Reliability Data)*. TRONDHEIM.
- Stapelberg, R. F. (2009). *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability, and Safety in Engineering in Design*. Londres: Springer - Velarg London Limited.
- Walas, S. M. (1990). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Washington: Butterworth-Heinemann.
- Williams, J. P. (2001). Predicting process systems. *Hydrocarbon Engineering*, 1-4.
- Yañez, M., & Semeco, K. (2005). Enfoque práctico para la confiabilidad y disponibilidad de equipos, con base en datos genéricos y opinión de expertos. *Reliarisk*.
- Zapata, C. J. (2011). *Confiabilidad en Ingeniería*. Dosquebradas: Publiprint Ltda.

# ANEXOS

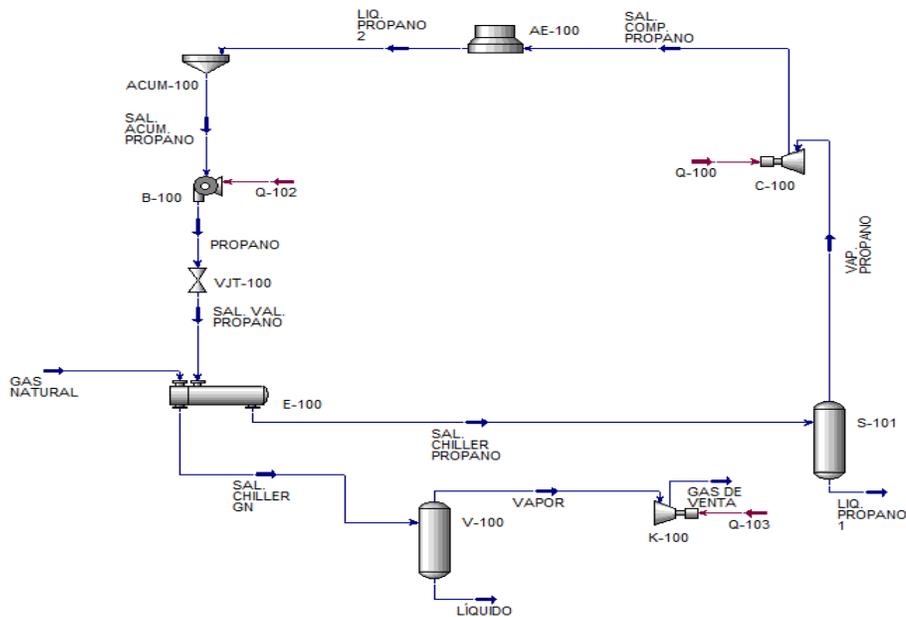
## 1. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON PROPANO

Entorno de simulación del sistema de refrigeración con propano



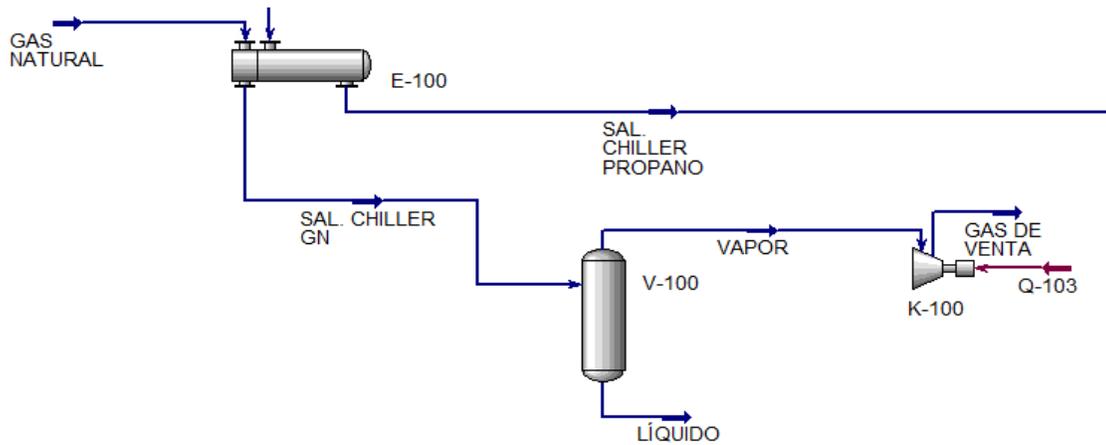
Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 1

Simulación del sistema de refrigeración de propano



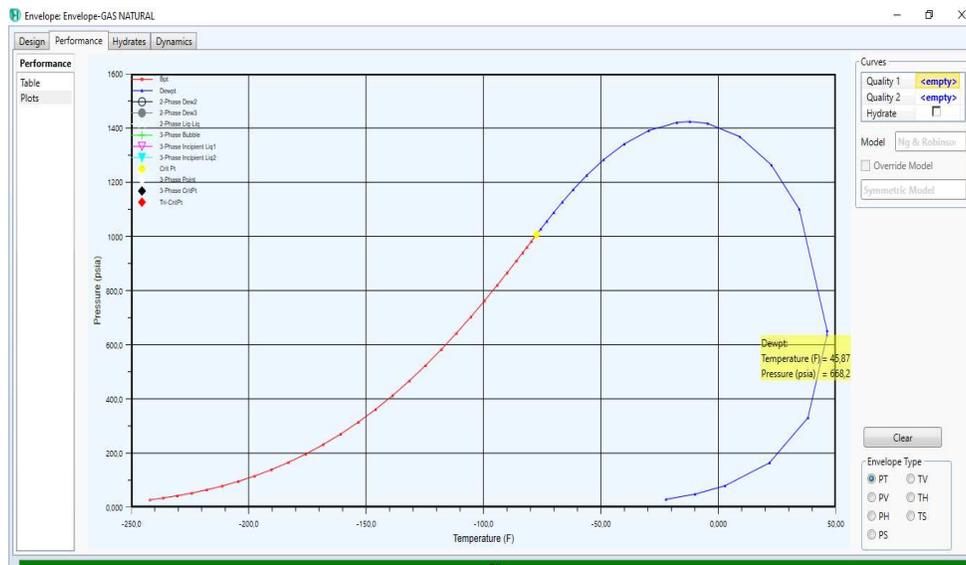
Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 10

## Simulación simplificada para la adecuación del gas natural a condiciones de venta



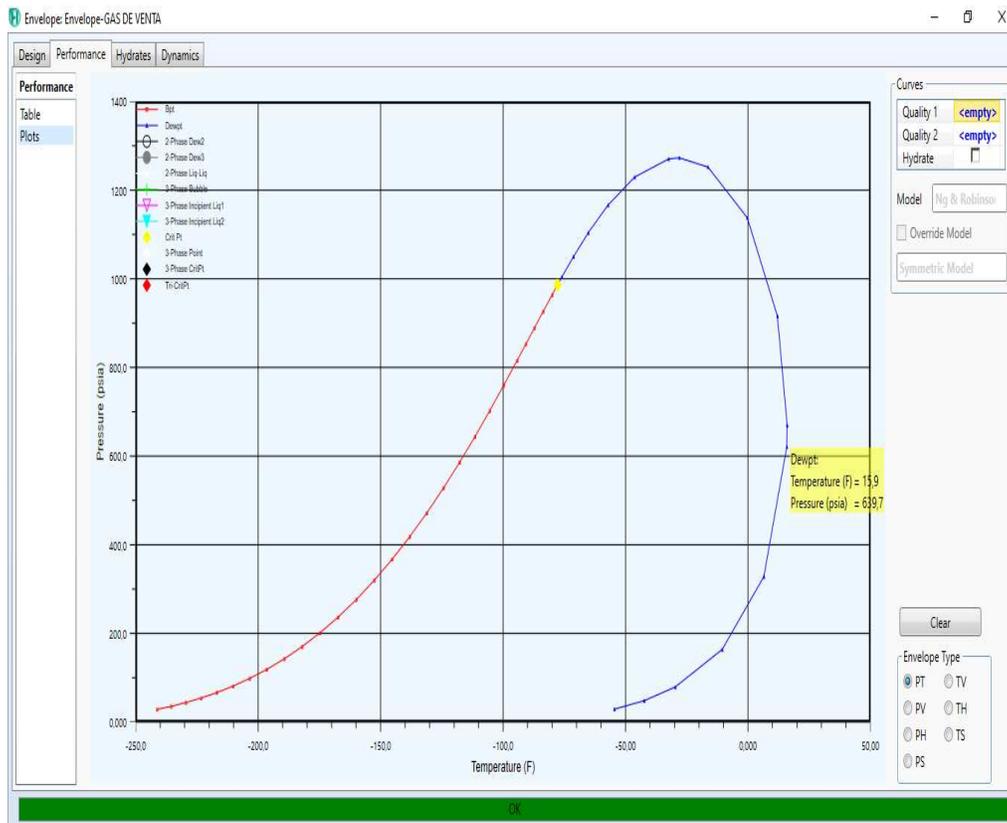
Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 10

## Curva envolvente P vs. T del gas natural antes de ingresar al Chiller



Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 10

## Curva envolvente P vs. T del gas natural después de ingresar al Chiller



Fuente: Elaboración propia con ayuda del software Aspen Hysys, V. 10

## 2. CÁLCULOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD

- **Suma de tasas de falla para cada equipo**

- Compresor de propano:

$$\lambda_{compresor} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$

$$\lambda_{compresor} = (3,41 + 72,66 + 45,55) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\lambda_{bomba} = 0,000122 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Condensador de propano:

$$\lambda_{condensador} = \lambda_1$$

$$\lambda_{condensador} = (6,85) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\lambda_{condensador} = \mathbf{0,000007} \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Depurador de succión:

$$\lambda_{depurador} = \lambda_1$$

$$\lambda_{depurador} = (6,46) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\lambda_{depurador} = \mathbf{0,000006} \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Chiller:

$$\lambda_{chiller} = \lambda_1$$

$$\lambda_{chiller} = (5,72) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\lambda_{chiller} = \mathbf{0,000006} \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Válvula J-T

$$\lambda_{válvula} = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\lambda_{válvula} = (4,93 + 2,68) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\lambda_{válvula} = \mathbf{0,000008} \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- **Suma de las desviaciones estándar para cada equipo**

- Compresor de propano:

$$\sigma_{compresor} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$\sigma_{compresor} = (3,77 + 149,99 + 114,85) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\sigma_{compresor} = 0,000269 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Condensador de propano:

$$\sigma_{condensador} = \sigma_1$$

$$\sigma_{condensador} = (6,85) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\sigma_{condensador} = 0,000007 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Depurador de succión:

$$\sigma_{depurador} = \sigma_1$$

$$\sigma_{depurador} = (4,28) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\sigma_{depurador} = 0,000004 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Chiller:

$$\sigma_{chiller} = \sigma_1$$

$$\sigma_{chiller} = (14,19) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\sigma_{chiller} = 0,000014 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Válvula J-T

$$\sigma_{v\acute{a}lvula\ J-T} = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\sigma_{v\acute{a}lvula\ J-T} = (7,94 + 4,07) \left( \frac{fallas}{10^6 h} \right)$$

$$\sigma_{v\acute{a}lvula\ J-T} = 0,000012 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- **Actualización de las tasas de falla**

- Compresor de propano

$$T = 34080 \text{ [h]}$$

$$r = 3$$

$$\lambda_{compresor} = 0,000122 \text{ [fallas/h]}$$

$$\sigma_{compresor} = 0,000269 \text{ [fallas/h]}$$

$$\lambda_{actualizada} = \frac{3 + \left( \frac{0,0001222}{0,000269} \right)^2}{34080 + \frac{0,000122}{0,000269^2}}$$

$$\lambda_{actualizada} = 0,00009 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Condensador de propano

$$T = 34080 \text{ [h]}$$

$$r = 2$$

$$\lambda_{condensador} = 0,000007 \text{ [fallas/h]}$$

$$\sigma_{condensador} = 0,000007 \text{ [fallas/h]}$$

$$\lambda_{actualizada} = \frac{2 + \left( \frac{0,000007}{0,000007} \right)^2}{34080 + \frac{0,000007}{0,000007^2}}$$

$$\lambda_{actualizada} = 0,000017 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- Depurador de succión

$$T = 34080 \text{ [h]}$$

$$r = 1$$

$$\lambda_{depurador} = 0,000006 \text{ [fallas/h]}$$

$$\sigma_{depurador} = 0,000004 \text{ [fallas/h]}$$

$$\lambda_{actualizada} = \frac{1 + \left(\frac{0,000006}{0,000004}\right)^2}{34080 + \frac{0,000006}{0,000004^2}}$$

$$\lambda_{actualizada} = 0,000008 \left[ \frac{\text{fallas}}{h} \right]$$

- Chiller

$$T = 34080 \text{ [h]}$$

$$r = 1$$

$$\lambda_{chiller} = 0,000006 \text{ [fallas/h]}$$

$$\sigma_{chiller} = 0,000014 \text{ [fallas/h]}$$

$$\lambda_{actualizada} = \frac{1 + \left(\frac{0,000006}{0,000014}\right)^2}{34080 + \frac{0,000006}{0,000014^2}}$$

$$\lambda_{actualizada} = 0,000041 \left[ \frac{\text{fallas}}{h} \right]$$

- Válvula J-T

$$T = 34080 \text{ [h]}$$

$$r = 3$$

$$\lambda_{válvula} = 0,000008 \text{ [fallas/h]}$$

$$\sigma_{válvula J-T} = 0,000012 \text{ [fallas/h]}$$

$$\lambda_{actualizada} = \frac{1 + \left(\frac{0,000008}{0,000012}\right)^2}{34080 + \frac{0,000008}{0,000012^2}}$$

$$\lambda_{actualizada} = 0,000039 \left[ \frac{fallas}{h} \right]$$

- **Cálculo de la confiabilidad de los equipos**

- Compresor de propano

$$\lambda_{compresor,actualizada} = 0,00009 \text{ [Fallas/h]}$$

$$t = 8520 \text{ [h]}$$

$$C = e^{-0,00009 * 8520}$$

$$C_{Compresor,1 \text{ año}} = 0,46604$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 1 - 0,46604$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 0,53396$$

- Condensador de propano

$$\lambda_{Condensador,actualizada} = 0,000017 \text{ [Fallas/h]}$$

$$t = 8520 \text{ [h]}$$

$$C = e^{-0,000017 * 8520}$$

$$C_{Condensador,1 \text{ año}} = 0,86767$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 1 - 0,86767$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 0,13233$$

- Depurador de succión

$$\lambda_{Depurador,actualizada} = 0,000017 \text{ [Fallas/h]}$$

$$t = 8520 \text{ [h]}$$

$$C = e^{-0,000017 * 8520}$$

$$C_{Depurador,1 \text{ año}} = 0,93033$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 1 - 0,93033$$

$$P_{falla,1 \text{ año}} = 0,06967$$

- Chiller

$$\lambda_{\text{Chiller,actualizada}} = 0,000041[\text{Fallas/h}]$$

$$t = 8520 \text{ [h]}$$

$$C = e^{-0,000041 \cdot 8520}$$

$$C_{\text{Chiller,1 año}} = \mathbf{0,70564}$$

$$P_{\text{falla,1año}} = 1 - 0,70564$$

$$P_{\text{falla,1 año}} = \mathbf{0,29436}$$

- Válvula J-T

$$\lambda_{\text{válvula,actualizada}} = 0,000039[\text{Fallas/h}]$$

$$t = 8520 \text{ [h]}$$

$$C = e^{-0,000039 \cdot 8520}$$

$$C_{\text{válvula,1 año}} = \mathbf{0,71625}$$

$$P_{\text{falla,1año}} = 1 - 0,71625$$

$$P_{\text{falla,1 año}} = \mathbf{0,28375}$$

- **Cálculo de la disponibilidad inherente de los equipos**

- Compresor de propano

$$\lambda_{\text{compresor,actualizada}} = 0,000090 \text{ [Fallas/h]}$$

$$MTBF = 207 \text{ [h]}$$

$$MTBF = \frac{1}{0,000090 \left[ \frac{\text{fallas}}{h} \right]}$$

$$MTBF = \mathbf{11159,30 \text{ [h]}}$$

$$A_i = \frac{11159,30}{11159,30 + 207}$$

$$A_{i\text{compresor}} = 0,98179$$

$$I_{\text{Compresor}} = 1 - 0,98179 = 0,01821$$

- Condensador de propano

$$\lambda_{\text{condensador,actualizada}} = 0,000017 \text{ [Fallas/h]}$$

$$MTBF = 6 \text{ [h]}$$

$$MTBF = \frac{1}{0,000017 \left[ \frac{\text{fallas}}{h} \right]}$$

$$MTBF = 60021,80 \text{ [h]}$$

$$A_i = \frac{60021,80}{60021,80 + 6}$$

$$A_{i\text{condensador}} = 0,99990$$

$$I_{\text{Condensador}} = 1 - 0,99990 = 0,00010$$

- Depurador de succión

$$\lambda_{\text{depurador,actualizada}} = 0,000008 \text{ [Fallas/h]}$$

$$MTBF = 14 \text{ [h]}$$

$$MTBF = \frac{1}{0,000008 \left[ \frac{\text{fallas}}{h} \right]}$$

$$MTBF = 117973,21 \text{ [h]}$$

$$A_i = \frac{117973,21}{117973,21 + 14}$$

$$A_{i\text{depurador}} = 0,99988$$

$$I_{Depurador} = 1 - 0,99988 = 0,00012$$

- Chiller

$$\lambda_{Chiller,actualizada} = 0,000041 \text{ [Fallas/h]}$$

$$MTBF = 40,5 \text{ [h]}$$

$$MTBF = \frac{1}{0,000041 \left[ \frac{fallas}{h} \right]}$$

$$\mathbf{MTBF = 24436,66 [h]}$$

$$A_i = \frac{24436,66}{24436,66 + 40,5}$$

$$\mathbf{A_{i chiller} = 0,99835}$$

$$I_{Chiller} = 1 - 0,99835 = 0,00165$$

- Válvula J-T

$$\lambda_{válvula,actualizada} = 0,000039 \text{ [Fallas/h]}$$

$$MTBF = 15 \text{ [h]}$$

$$MTBF = \frac{1}{0,000039 \left[ \frac{fallas}{h} \right]}$$

$$\mathbf{MTBF = 25529,71 [h]}$$

$$A_i = \frac{25529,71}{25529,71 + 15}$$

$$\mathbf{A_{i válvula} = 0,99941}$$

$$I_{Chiller} = 1 - 0,99941 = 0,00059$$

- **Cálculo de la mantenibilidad de los equipos**

- Compresor de propano

$$t = 24 \text{ [h]}$$

$$MTTR = 207 \text{ [h]}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{24}{207}\right)}$$

$$\mathbf{M(t)_{Compresor} = 0,10947}$$

- Condensador de propano

$$t = 24 \text{ [h]}$$

$$MTTR = 6 \text{ [h]}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{24}{6}\right)}$$

$$\mathbf{M(t)_{Condensador} = 0,98168}$$

- Depurador de succión

$$t = 24 \text{ [h]}$$

$$MTTR = 14 \text{ [h]}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{24}{14}\right)}$$

$$\mathbf{M(t)_{Condensador} = 0,81991}$$

- Chiller

$$t = 24 \text{ [h]}$$

$$MTTR = 40,5 \text{ [h]}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{24}{40,5}\right)}$$

$$\mathbf{M(t)_{Chiller} = 0,44711}$$

- Válvula J-T

$t = 15$  [h]

$MTTR = 40,5$  [h]

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{24}{40,5}\right)}$$

$$M(t)_{Válvula} = 0,79810$$

### 3. COSTOS CAPEX Y OPEX DEL SISTEMA ALTERNATIVO

Costos Capex para el sistema de refrigeración de propano alternativo

<b>COSTOS CAPEX</b>			
<b>COSTOS DE ADQUISICIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$]</b>	<b>COSTO TOTAL [\$]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	2	\$4.900,0	\$9.800,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	2	\$902.000,0	\$1.804.000,0
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$57.500,0	\$57.500,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$15.600,0	\$15.600,0
<b>CHILLER</b>	1	\$29.000,0	\$29.000,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	2	\$2.000,0	\$4.000,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$6.000,0	\$6.000,0
<b>TOTAL COSTOS DE ADQUISICIÓN [\$]</b>			<b>\$1.921.000,00</b>
<b>COSTOS DE INSTALACIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$]</b>	<b>COSTO TOTAL [\$]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	2	\$34.500,0	\$69.000,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	2	\$1.038.300,0	\$2.076.600,0
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$104.300,0	\$104.300,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$113.800,0	\$113.800,0
<b>CHILLER</b>	1	\$185.900,0	\$185.900,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$1.200,0	\$1.200,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$20.000,0	\$20.000,0
<b>TOTAL [\$]</b>			<b>\$2.570.800,0</b>
<b>TOTAL CAPEX [\$]</b>			<b>\$4.496.700,0</b>

Fuente: Elaboración propia

Costos Opex para el sistema de refrigeración de propano alternativo

<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$/AÑO]</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL [\$/AÑO]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	\$2.000,0	\$2.000,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	\$12.000,0	\$12.000,0
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$10.000,0	\$10.000,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$5.000,0	\$5.000,0
<b>CHILLER</b>	1	\$7.000,0	\$7.000,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$7.000,0	\$7.000,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$5.000,0	\$5.000,0
<b>COSTO TOTAL DE OPERACIÓN [\$/AÑO]</b>			<b>\$48.000,0</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$/AÑO]</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL [\$/AÑO]</b>
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	1	\$1.182,0	\$1.182,0
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	1	\$58.209,0	\$58.209,0
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	1	\$4.854,0	\$4.854,0
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	1	\$3.882,0	\$3.882,0
<b>CHILLER</b>	1	\$6.447,0	\$6.447,0
<b>VÁLVULA J-T</b>	1	\$96,0	\$96,0
<b>ACUMULADOR DE PROPANO</b>	1	\$600,0	\$600,0
<b>COSTO TOTAL DE MANTENIMIENTO [\$/AÑO]</b>			<b>\$75.270,0</b>
<b>COSTO TOTAL POR BAJA CONFIABILIDAD [\$/AÑO]</b>			<b>\$169.197,3</b>
<b>COSTO TOTAL OPEX [\$/AÑO]</b>			<b>\$2.077.072,6</b>

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Costos por baja confiabilidad del sistema alternativo

EQUIPO	ID.	$CD_{\lambda}$ [\$]	CP [\$/h]	CPP [\$/h]	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/h]	$\lambda_{ACTUALIZADA}$ [fallas/año]	MTTR [h]	$C_{B\bar{C}}$ [\$/AÑO]
<b>BOMBA DE RECIRCULACIÓN DE PROPANO</b>	B-100	2147,0	0	0	0,000087	0,74400885	96	\$1.597,39
<b>COMPRESOR DE PROPANO</b>	C-100	31372,5	0	0	0,000090	0,76348864	207	\$23.952,55
<b>CONDENSADOR DE PROPANO</b>	AE-100	1850,0	1850,0	5440,9	0,000017	0,14194842	6	\$6.472,19
<b>DEPURADOR DE SUCCIÓN</b>	S-100	759,7	759,7	5440,9	0,000008	0,07221979	14	\$6.324,11
<b>CHILLER</b>	E-100	1713,8	1713,8	5440,9	0,000041	0,34865642	40,5	\$101.625,30
<b>VÁLVULA J-T</b>	VJT-100	372,5	372,5	5440,9	0,000039	0,33372883	15	\$29.225,78
<b>TOTAL [\$/AÑO]</b>								<b>\$169.197,31</b>

Fuente: Elaboración propia