

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



**“PROPUESTA DE REDISEÑO LÓGICO-
FUNCIONAL DE SISTEMA DE BOMBEO DE
COMBUSTIBLE EN PROCESO HIDRO-CRACKING
PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE
PARÁMETROS RAM”**

OSCAR IGNACIO YANCA PIZARRO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR.-ING. JAIME NÚÑEZ

PROFESOR CORREFERENTE: ING. NELSON ÁLVAREZ

SUPERVISOR: ING. FRANCISCO BADILLA

ENERO – 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: "PROPUESTA DE REDISEÑO LÓGICO-FUNCIONAL DE SISTEMA DE BOMBEO DE COMBUSTIBLE EN PROCESO HIDRO-CRACKING PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE PARÁMETROS RAM"

Nombre del candidato(a): Oscar Ignacio Yanca Pizarro

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Jaime Núñez Segovia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

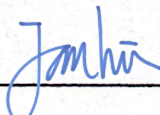
☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24-02-2026

; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21-01-2026

; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Con gran alegría y emoción, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me acompañaron durante mi camino universitario y que formaron parte de este hermoso recorrido.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, quienes me inculcaron los valores que me definen y me guiaron hasta la meta. A mi madre, por su apoyo incondicional, por estar siempre presente cuando la necesité y por ser mi modelo para seguir, tanto en lo profesional como en lo humano. A mis abuelos, quienes me criaron con amor y que nunca dudaron de que lograría este objetivo, acompañándome con cariño en los momentos más difíciles. A mi tío, por su constante apoyo y por saber sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba.

Extiendo también mi gratitud a las amistades que formé durante mi vida universitaria, que fueron un pilar fundamental durante el este proceso. Su lealtad, apoyo y compañía hicieron que esta etapa sea inolvidable.

Agradezco también a los ingenieros que me dieron la oportunidad de participar en el proyecto, sobre todo a mi supervisor, por confiar en mis capacidades, orientarme y ofrecerme su ayuda siempre que fue necesario.

Finalmente, quiero agradecer a mis profesores por entregarme todo el conocimiento y herramientas para poder formarme como ingeniero y prepararme para los desafíos de la vida profesional que se aproxima.

A todas las personas que fueron parte de este camino, les agradezco profundamente por las enseñanzas, el apoyo y las experiencias compartidas, que han contribuido a forjar no solo a un profesional, sino también a una persona. Espero haber dejado una huella positiva en sus vidas.

RESUMEN

El sistema de bombeo de gasoil de la unidad de Hidro-cracking de ENAP Refinería Bío-Bío, configurado lógicamente en serie, presenta problemas de indisponibilidad e incumplimiento de función debido a detenciones no planificadas, generando altos costos asociados.

El objetivo de este trabajo es proponer un rediseño de este sistema orientado a mejorar el desempeño de los parámetros RAM (confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad), realizando simulaciones, evaluación económica y recomendaciones acciones de mantenimiento para los equipos involucrados, bajo suposiciones y consideraciones en la modelación, sin tener la certeza absoluta de representar el comportamiento real futuro del sistema.

Se proponen dos alternativas de configuración, el Sistema Propuesto 1 y el Sistema Propuesto 2. Comparadas con el sistema actual mediante simulaciones de cuatro años basadas en Diagramas de Bloques de Confiabilidad. A dicho horizonte, Sistema propuesto 1 alcanza incrementos de 70,91, 11,54 y 20,91 puntos porcentuales en confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad respectivamente, mientras que el Sistema Propuesto 2 muestra incrementos de 5,90, 10,67, y 22,33 puntos porcentuales en los mismos indicadores respectivamente.

La evaluación económica considera dos escenarios según el tipo de incumplimiento de función. En ambos, el Sistema propuesto 1 presenta los menores costos al cuarto año, siendo hasta 90,03% y 42,16% inferiores con respecto al sistema actual y al Sistema Propuesto 2 respectivamente, dependiendo del escenario. El Sistema propuesto 2, en cambio, siempre alcanza antes su periodo de retorno de inversión. Dependiendo del escenario, puede ser hasta 0,14 años antes que el Sistema Propuesto 1.

Finalmente, se recomiendan acciones para mejorar la calidad de los registros de detenciones del sistema de bombeo de gasoil actual, junto con tareas de mantenimiento basadas en condición para el modo de falla “fuga de sellos mecánicos”.

Palabras claves: RAM, confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad.

ABSTRACT

The gasoil pumping system of the hydrocracking unit at ENAP Refinería Bío-Bío, logically configured in series, has problems with unavailability and functional failures due to unplanned shutdowns, generating high associated costs.

The objective of this work is to propose a redesign of this system to improve the performance of RAM parameters (reliability, availability and maintainability), through simulations, economic evaluation, and recommendations for maintenance actions for the equipment involved, under modeling assumptions and considerations, without absolute certainty of representing the system's real future behavior.

Two configuration alternatives are proposed: Sistema Propuesto 1 and Sistema Propuesto 2. They are compared with the current system using four-year simulations based on Reliability Block Diagrams. Over this period, Sistema Propuesto 1 achieves increases of 70.91, 11.54 and 20.91 percentage points in reliability, availability and maintainability, respectively, while Sistema Propuesto 2 shows increase of 5.90, 10.67 and 22.33 percentage points in the same indicators, respectively.

The economic evaluation considers two scenarios depending on the type of functional failure. In both, Sistema Propuesto 1 has the lowest cost in the fourth year, being up 90.03% and 42.16% lower than the current system and Sistema Propuesto 2, respectively, depending on the scenario. Sistema Propuesto 2, on the other hand, always reaches its payback sooner. Depending on the scenario, it can be up to 0,14 years earlier than Sistema Propuesto 1.

Finally, actions are recommended to improve the quality of the downtime records for the current gasoil pumping system, along with condition-based maintenance tasks for the “mechanical seal leakage” failure mode.

Keywords: RAM, reliability, availability, maintainability.

GLOSARIO

HCK: Hidro-Cracking.

METBF: Mean Elapsed Time Between Failures.

MTBF: Mean Operating Time Between Failures.

MTTF: Mean Time To Failure.

MTTR: Mean Time To Repair.

MTTRES: Mean Time To Restoration.

P1: Sistema Propuesto 1.

P2: Sistema Propuesto 2.

RAM: Reliability, Availability & Maintainability.

RBD: Reliability Block Diagram.

RCM: Reliability Centered Maintenance.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
GLOSARIO	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
ANTECEDENTES GENERALES	xv
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	xxvi
OBJETIVOS	xxvii
PLAN DE TRABAJO	xxviii
1. Marco Teórico.....	31
1.1 Conceptos y definiciones fundamentales de los indicadores RAM	31
1.2 Influencia del diseño de sistemas en los indicadores RAM	35
1.2.1 Bloques de confiabilidad (RBD).....	36
1.3 Formas para pronosticar el comportamiento de los parámetros RAM.....	39
1.3.1 Estudios previos de estimación y pronósticos de parámetros RAM.....	40
1.3.2 Herramientas para obtener y pronosticar el comportamiento de los parámetros RAM.....	48
1.4 Costo de ciclo de vida (LCC)	52
1.4.1 Conceptos relacionados al LCC	52
1.4.2 Modelo de Woodward	53

1.4.3	Ahorro de costos y payback	54
1.5	Fundamentos para la toma de decisiones de mantenimiento	55
1.5.1	Tipos de mantenimiento.....	56
1.5.2	Gráfico Jack-knife.....	56
1.5.3	Árbol lógico de decisión RCM	57
2.	Caracterización del sistema de bombeo de gasoil	60
2.1	Descripción general del sistema de bombeo de gasoil actual.....	61
2.1.1	Definición de límites y función del sistema de bombeo de gasoil.....	62
2.1.2	Características de las bombas J-700 y J-700S.....	63
2.1.3	Contexto de evolución del sistema de bombeo de gasoil y sus exigencias	66
2.2	Representación de la configuración lógica del sistema de bombeo de gasoil mediante Diagrama de Bloques de Confiabilidad.....	66
2.3	Evaluación teórica de la confiabilidad del sistema de bombeo de gasoil ante la evolución del contexto operacional	68
2.4	Recolección y evaluación de información del historial de vida del sistema de bombeo de gasoil.....	71
2.4.1	Datos del historial de vida que recomienda registrar la ISO 14224:2016.	71
2.4.2	Fuentes de información disponibles sobre el historial de vida del sistema de bombeo de gasoil y periodo de estudio.....	73
2.4.3	Evaluación de la calidad de los datos.....	74
2.5	Evaluación de parámetros RAM para el sistema de bombeo de gasoil actual	78
2.5.1	Consideraciones, suposiciones y criterios para la simulación del sistema de bombeo de gasoil actual.....	79

2.5.2	Resultados en base al historial de vida y simulación de sistema de bombeo de gasoil actual.....	83
2.5.2.1	Resultados en base al historial de vida del sistema de bombeo de gasoil actual.....	84
2.5.2.2	Resultados de la simulación del sistema de bombeo de gasoil actual	88
3.	Propuestas de rediseño del sistema.....	89
3.1	Descripción de las alternativas de reconfiguración propuestas.....	91
3.2	Suposiciones y consideraciones para la simulación de sistemas propuestos	94
3.3	Resultados de la simulación de los sistemas propuestos	100
4.	Evaluación económica del sistema de bombeo de gasoil actual y de los sistemas propuestos	106
4.1	Cálculo de LCC de sistema de bombeo de gasoil actual y sistemas propuestos	107
4.1.1	Suposiciones y consideraciones para aplicar el modelo de Woodward	107
4.1.2	Resultados de LCC de sistema de bombeo de gasoil y sistemas propuestos	110
4.1.3	Resultados de Ahorros de Costos generados por los sistemas propuestos	119
4.1.4	Resultados de Payback de sistemas propuesto.....	123
5.	Acciones de mantenimiento recomendadas	128
5.1	Acciones recomendadas para mejorar la calidad de los datos en el sistema de bombeo de gasoil.....	129
5.2	Aplicación del árbol lógico de decisión del RCM	131
5.2.1	Identificación del modo de falla más crítico	131

5.2.2 Acciones de mantenimiento recomendadas en base al árbol lógico de decisión del RCM	138
CONCLUSIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	143
ANEXOS	146

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Unidades de ENAP Refinerías.....	xvi
<i>Figura 2.</i> Diagrama de Plan de Trabajo.....	xxviii
<i>Figura 3.</i> Tiempos de mantenimiento.....	33
<i>Figura 4.</i> Tiempos medios asociados a Up Time y Down Time.	34
<i>Figura 5.</i> Configuración en serie de diagrama de bloques confiabilidad.	36
<i>Figura 6.</i> Configuración en paralelo con redundancia total de diagrama de bloques de confiabilidad.....	37
<i>Figura 7.</i> Configuración en paralelo con redundancia parcial de diagramas de bloques de confiabilidad.	37
<i>Figura 8.</i> Configuración en stand-by de diagrama de bloques de confiabilidad.	38
<i>Figura 9.</i> Gráfico de confiabilidad para el sistema simple, redundancia activa y redundancia pasiva (stand-by).	39
<i>Figura 10.</i> Diagrama del sistema de bombeo de inyección.	40
<i>Figura 11.</i> Diagrama de procesos para la metodología RAM.	41
<i>Figura 12.</i> Diagrama de bloques de confiabilidad cargado para el modelo.	42
<i>Figura 13.</i> Confiabilidad por componentes para $t=8760$ h.	43
<i>Figura 14.</i> Disponibilidad por subsistemas.	43
<i>Figura 15.</i> Mantenibilidad de componentes para intervalo de 40 horas.	44
<i>Figura 16.</i> Diagrama de bloques, sistema eléctrico.	45
<i>Figura 17.</i> Esquema de la metodología RAM (esquema proporcionado por la empresa RC).	46
<i>Figura 18.</i> Esquema de los pasos del RAMS y evaluación del ciclo de vida (esquema proporcionado por la empresa RC).	47
<i>Figura 19.</i> Formato de las tablas de confiabilidad.....	49
<i>Figura 20.</i> Método gráfico Jack-knife.	57
<i>Figura 21.</i> Árbol de decisión de RCM.....	59
<i>Figura 22.</i> Representación de disposición física del sistema de bombeo de gasoil en HCK.	62

<i>Figura 23.</i> Imagen de J-700SPARE en el taller de mantenimiento.....	64
<i>Figura 24:</i> Representación del sistema analizado en Diagrama de Bloques de Confiabilidad.....	67
<i>Figura 25.</i> Representación en diagrama de bloques de detención total de sistema actual.	68
<i>Figura 26.</i> Representación en diagrama de bloques de detención total de sistema actual.	68
<i>Figura 27.</i> Representación de sistema de bombeo de gasoil pre-revamping en Diagrama de Bloques de Confiabilidad.	69
<i>Figura 28.</i> Tasa de falla de OREDA para bombas.	69
<i>Figura 29.</i> Gráfico comparativo entre confiabilidad de sistemas de bombeo de gasoil antes y después del revamping.....	70
<i>Figura 30.</i> Gráfico de proporción de cumplimiento de registros de J-700.....	75
<i>Figura 31.</i> Proporción de cumplimiento de registros de J-700S.	76
<i>Figura 32.</i> Modelamiento de sistema de bombeo actual en software.....	81
<i>Figura 33.</i> Modelamiento en software de modos de falla J-700.....	82
<i>Figura 34.</i> Modelación en software de modos de falla J-700S.....	82
<i>Figura 35.</i> Gráfico de proporción del tiempo de detención según tipo de evento de subsistema J-700.	85
<i>Figura 36.</i> Gráfico Jack-knife de subsistema J-700.....	86
<i>Figura 37.</i> Gráfico de proporción del tiempo de detención según tipo de evento de subsistema J-700S.	86
<i>Figura 38.</i> Gráfico Jack-knife de subsistema J-700S.	87
<i>Figura 39.</i> Representación en diagrama de bloques de Sistema Propuesto 1.....	91
<i>Figura 40 .</i> Representación en diagrama de bloques de bajada de carga de Sistema Propuesto 1.....	92
<i>Figura 41.</i> Representación en diagrama de bloques de confiabilidad para la detención total del Sistema Propuesto 1.	92
<i>Figura 42.</i> Representación en diagrama de bloques de confiabilidad del Sistema Propuesto 2.....	93

<i>Figura 43.</i> Representación en diagrama de bloque de bajada de carga de sistema propuesto 2.....	94
<i>Figura 44.</i> Representación en diagrama de bloque de detención total del sistema propuesto 2.....	94
<i>Figura 45.</i> Modelamiento de Sistema Propuesto 1 en software.....	97
<i>Figura 46.</i> Modelamiento de Sistema Propuesto 2 en software.....	98
<i>Figura 47.</i> Gráfico de confiabilidad de sistemas actual y propuestos.	104
<i>Figura 48.</i> Gráfico de mantenibilidades de sistemas actuales y propuestos.....	105
<i>Figura 49.</i> Gráfico LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario optimista.....	111
<i>Figura 50.</i> Gráfico de LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario pesimista.....	114
<i>Figura 51.</i> Gráfico de ahorro de costos por sistemas en escenario optimista.....	121
<i>Figura 52.</i> Gráfico de ahorro de costos por sistemas en escenario pesimista.....	122
<i>Figura 53.</i> Gráfico de ahorro acumulado del sistema propuesto 1 en escenario optimista.....	125
<i>Figura 54.</i> Gráfico de ahorro acumulado del sistema propuesto 1 y sistema propuesto 2 en escenario pesimista.....	126
<i>Figura 55.</i> Gráfico de confiabilidad en componentes del sistema de bombeo de gasoil actual.	133
<i>Figura 56.</i> Gráfico de confiabilidad en componentes del sistema propuesto 1.....	135
<i>Figura 57.</i> Gráfico de confiabilidad en componentes del sistema propuesto 2.....	137

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga J-700.....	63
<i>Tabla 2.</i> Datos de equipos, fallas y mantenimiento a registrar que recomienda la ISO 14224:2016.....	72
<i>Tabla 3</i> Parámetros obtenidos de simulación del sistema de bombeo de gasoil actual.	88
<i>Tabla 4.</i> Resultados de simulación para sistema actual y propuestos.....	101
<i>Tabla 5.</i> Tasa de falla de los modos de falla al cuarto año para cada sistema.	109
<i>Tabla 6.</i> Detalle de LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario optimista.....	112
<i>Tabla 7.</i> Detalle de LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario pesimista.....	115
<i>Tabla 8.</i> Detalle de los costos por categoría en el cuarto de evaluación para los escenarios optimista y pesimista.	117
<i>Tabla 9.</i> Detalle de ahorros de costos de los sistemas propuestos en escenarios optimista y pesimista.....	120
<i>Tabla 10.</i> Detalle de ahorros de costos acumulados de los sistemas propuestos en escenarios optimista y pesimista.	124
<i>Tabla 11.</i> Tabla resumen de paybacks obtenidos.....	126
<i>Tabla 12.</i> Tiempos medios de componentes en sistema de bombeo de gasoil actual al cuarto año de evaluado.....	133
<i>Tabla 13.</i> Tiempos medios de componentes en Sistema Propuesto 1 al cuarto año de evaluado.	134
<i>Tabla 14.</i> Tiempos medios de componentes en Sistema Propuesto 2 al cuarto año de evaluado.	136

INTRODUCCIÓN

Las fallas y detenciones no planificadas de activos críticos impactan directamente en la capacidad de producción, seguridad operacional y el cumplimiento de normativas ambientales en el sector industrial. ENAP Refinería Bío-Bío, una de las dos refinerías presentes en Chile, enfrenta recurrentemente detenciones no planificadas en sus activos críticos.

Ante la necesidad de mitigar estas detenciones, y tras evaluar metodologías de gestión de fallas (FMEA, RCM, RCA, entre otras), la empresa opta por primera vez enfocar la mejora de desempeño operacional a través de los parámetros RAM (confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad) mediante la aplicación de Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD). Esta iniciativa se propone como un proyecto piloto, sentando las bases para expandir la utilización del análisis RAM y RBD a otras áreas críticas de la refinería.

En este trabajo, se proponen y evalúan configuraciones de rediseño lógico-funcional mediante Diagramas de Bloques de Confiabilidad aplicados a un subsistema clave de la unidad de Hidro-Cracking. El plan de trabajo incluye un marco teórico para entender los fundamentos de los indicadores RAM, la caracterización del sistema actual mediante la recolección de datos del historial de vida de equipos involucrados, el modelamiento y simulación de configuraciones propuestas para la mejora del desempeño de los indicadores RAM y finalmente, recomendaciones de acciones de mantenimiento.

ANTECEDENTES GENERALES

La Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) fue fundada en 1951. Es una empresa del Estado de Chile dedicada a producir derivados de petróleo mediante este orden consecutivo (ENAP, s.f):

- Exploración y producción de hidrocarburos
- Refinación avanzada de recursos
- Transporte seguro y comercialización estratégica de petróleo, gas y otros productos derivados del petróleo, energía eléctrica y geotérmica.

En lo que respecta Refinación y Comercialización, es a través de ENAP Refinerías que se gestiona la importación, producción, almacenamiento y comercialización de hidrocarburos y sus derivados.

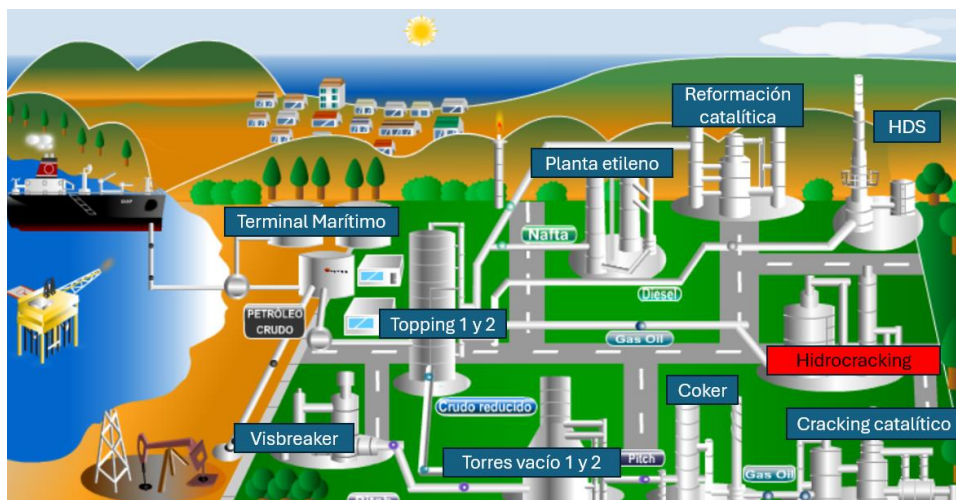
Los principales productos y servicios corresponden a los que son refinados de petróleo, principalmente gasolinas, diésel y queroseno, gas natural y energía, además de la generación de energía eléctrica (cogeneración, geotermal y eólica).

ENAP participa en el mercado de producción y venta de combustibles y productos a base de petróleo crudo en Chile. Sus principales clientes son COPEC, Enx y Esmx. Se comercializa y exporta gas licuado del petróleo (GLP) a través del muelle de Cabo Negro. A nivel internacional se enfrenta a otros refinadores y comercializadores de productos refinados. Participa en el mercado chileno de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica y en el mercado del gas. Los combustibles líquidos se distribuyen y venden por vía marítima y terrestre a través de buques de cabotajes, muelles, oleoductos y patios de carga. El gas natural también se moviliza por vía marítima y terrestre, por gasoductos y camiones en plantas satelitales de regasificación.

La estrategia de negocio que tiene la empresa entre el 2023 y 2027 en cuanto a Refinerías es:

- Refinación: Incorporar tecnología como palanca de productividad y eficiencia en costos.

- La disposición general de las plantas de refinería de ENAP se presenta en la Figura 1:



Las descripciones de los procesos que se presentan en la Figura 1 son:

- Las bombas de carga previamente descargan el crudo por intercambiadores de calor, de manera de ser precalentado por productos que salen de torres de fraccionamiento, llegando a un desalador eléctrico para remover las sales y otras impurezas disueltas en agua del crudo. Continúa un precalentamiento para que posteriormente el crudo llegue a un separador flash donde se produce la separación de sus componentes más livianos (ya vaporizados), los cuales van a otra torre fraccionadora. Desde el separador el crudo es descargado por bombas

hacia el horno, donde la fracción parcialmente vaporizada se dirige a la zona flash de la torre fraccionadora donde las fases de líquido y vapor se separan, circulando hacia platos de la torre inferiores y superiores respectivamente.

Por el tope de la torre salen vapores constituidos por gases livianos, propano, butano y gasolina, que condensan en intercambiadores de calor y llegan a un acumulador. Los gases no condensados son enviados por un compresor a la unidad Recuperación de livianos y en cuanto al líquido, una parte es retornada a la torre como reflujo de tope y la otra parte constituye la carga de la torre estabilizadora de gasolina, donde son separados el propano y butano de la gasolina. La mezcla de propano y butano va como carga a la unidad de recuperación de livianos (URL) y la gasolina es enviada a estanque para ser utilizada como carga de la unidad de etileno o en las mezclas de las diferentes gasolinas preparadas en refinería.

- Topping 2: En esta unidad, a través de la aplicación de temperatura en una torre, el crudo se fracciona en una serie de productos que se comercializan o sirven como carga para otras unidades. Los productos que se manejan son los gases livianos, gas licuado (LPG), gasolina de topping, nafta, kerosene doméstico, kerosene de aviación, diesel, gasoil atmosférico y crudo reducido.

Los gases livianos y el gas licuado van a tratamiento para reducir el contenido de compuestos azufrados a los límites permitidos. La gasolina de topping se usa como carga para la planta de etileno, o se trata en la planta de isomerización o va directamente a la preparación de gasolinas comerciales. La nafta sirve de carga o materia prima a las unidades de reformación catalítica, de etileno y de solventes. Tanto los kerosenes como el diesel son productos que pasan a integrar directamente productos comerciales. El gasoil atmosférico se utiliza como carga para las plantas de craqueo catalítico e hidro-cracking. Finalmente, el producto de fondo de torre (crudo reducido) es la carga para las unidades de fraccionamiento al vacío.

- Torre de Vacío 1: Las torres de vacío son unidades de destilación a vacío que procesan el producto de fondo de las unidades de topping, lo cual permite

disminuir la temperatura en la torre y posibilitar el fraccionamiento del producto de fondo, evitando la ruptura de moléculas o cracking térmico. El crudo reducido es impulsado por bombas hacia un horno, de tal manera de subir la temperatura hasta la zona flash de la zona de vacío. Al llegar a esta zona flash el crudo reducido parcialmente vaporizado, se separan los vapores del líquido. La sección superior de esta torre es la sección de gasoil liviano que dispone de un colector, el cual es extraído desde ahí y enviado como carga a las unidades de HCK, MHC o FCCU. El segundo camino que toma es la sección de gas oil pesado, desde cuyo colector el producto es succionado por bombas, enviando normalmente este producto como carga de HCK, MHC o FCCU. Cuando la producción de gasoil excede de las cargas de las unidades conversoras secundarias, se puede enviar este exceso de producción a estanques para almacenamiento.

El producto de fondo de la torre de vacío es el pitch, el cual es el producto que tiene mayor densidad y viscosidad de las zonas de Topping y Vacío. Este constituye la carga de la unidad de Coker o de la unidad de Visbreaking y, eventualmente, puede ser enviado también a estanques para ser almacenado como fuel oil o producción de asfalto.

- Torre de vacío 2: Aquí se fracciona el crudo reducido a presiones bajo la atmosférica, para obtener cantidades adicionales de gas oil y pitch (o fondo de vacío). Este gasoil de vacío va a Cracking Catalítico y a Hidrocracking (normal o suave). El pitch es la carga para la unidad de visbreaker (o visco-reducción) y se utiliza en la preparación de fuel oils (petróleo y combustibles) y en base para asfaltos. También se utiliza el pitch como materia prima de la planta de Coquificación Retardada o Coker (Petropower) para obtener cantidad adicionales de Diesel y Nafta.
- Visbreaker: Tiene como objetivo extraer productos de mayor valor agregado a partir de los fondos de vacío de Topping 1 y 2 (Pitch). La función de la unidad de Visbreaking es reducir la viscosidad del producto de fondo de las torres de vacío, mencionados anteriormente como pitch, con el fin de disminuir la

cantidad de diesel necesaria para la preparación de fuel oil. Esta reducción de viscosidad se consigue mediante un cracking térmico moderado, que consiste en el rompimiento de las largas moléculas de hidrocarburos que componen el pitch, transformándolo en un producto más liviano. En casos especiales, la planta puede operar con alimentación de crudo reducido desde los topping o complementar además la carga con fuel oil desde estanques.

El pitch de alimentación proveniente de las torres de Vacío 1 o Vacío 2 llega a un acumulador de carga. Desde el fondo de éste lo toman las bombas de carga y lo envían directamente al horno. Antes de su entrada a éste, la carga pitch se divide en dos corrientes, entrando separadamente para alcanzar su temperatura de trabajo. El producto sale del horno y cada salida es enfriada bruscamente por medio de flujos fríos denominados “Quench”. El objetivo de este último es detener las reacciones de cracking para evitar la deposición de coque en la línea de transferencia. Este es tomado por una bomba que lo descarga a enfriar hacia un generador de vapor, para ser usado posteriormente en enfriar la salida del horno.

Después del horno, el producto llega a un condensador de contacto, el cual alimenta a la torre fraccionadora principal por una línea de tope que descarga vapores hacia la torre y por una línea de fondo que descarga el líquido a través de una línea de transferencia. Ambas llegan a la zona flash de la torre. En ésta los vapores ascienden y el líquido cae al fondo.

Los vapores que salen por el tope de la torre condensan en un intercambiador con agua y llegan a un acumulador de tope. Los gases no condensados son enviados por un compresor a la unidad de recuperación de livianos. El líquido, constituido por gasolina, lo toma una bomba de descarga hacia el acumulador de tope de la torre fraccionadora de Torre de Vacío 1 o Torre de Vacío 2 para su estabilización. Se extrae diesel o gasoil desde un “stripper” (torre lateral anexa a la fraccionadora) y es descargado hacia un estanque junto con el producto de fondo de la torre, constituyendo el fuel oil base.

El producto de fondo es tomado por bombas que lo envían al estanque luego de ser enfriados y de haberles adicionado el gasoil de esta unidad y una cierta cantidad de diesel que ajusta su viscosidad y su temperatura. Finalmente, esto constituye la producción de fuel oil o petróleo combustible.

- Planta etileno: Produce gases livianos, LPG, etileno propileno y gasolina de alto octanaje. El etileno se envía por tuberías hasta la planta de Petrodow donde se transforma en polietileno. Este último se usa como carga para la planta de polipropileno de Petroquim. Esta unidad recibe como carga la gasolina de topping, nafta o una mezcla de ambas.
- Reformación catalítica: Es el mejoramiento del octanaje de la gasolina y la refinación de naftas craqueados.

Los naftenos de C5 y C6 son isomerizados y deshidrogenados en aromáticos, mientras que las parafinas son hidrocraqueadas o ciclizadas e hidrogenadas en aromáticos. Las reacciones se llevan a cabo en reactores con hornos a la entrada de estos. El hidrógeno es reciclado para prevenir formación del carbón en la superficie.

La reformación catalítica es también una fuente de benceno, tolueno y xileno. El componente para esta producción es nafta. Todas las reacciones en esta reformación producen grandes cantidades de hidrógeno, ya que varios reformadores son regenerados, utilizando un gas inerte y reciclado. Las aplicaciones para un sistema de adsorción son:

- Secar y purificar hidrógeno reciclado.
 - Secar y desulfurar el almacenamiento de alimentación de nafta.
 - Secar el gas de refrigeración de la generación de gas inerte.
 - Secar gas de regeneración reciclado
 - Purificar el hidrógeno producido durante la reformación para venta u otra aplicación de refinería.
- Hidrocracking: El objetivo de esta unidad es convertir el gasoil de las unidades de Toppin y Vacío en diesel con bajo contenido de azufre. Como subproductos se obtienen nafta y gasoil con bajo de azufre.

El proceso de hidrocracking es un método de hidrogenación catalítica de dos etapas. La primera etapa o hidrotratamiento elimina contaminantes de los gasoiles de vacío, como azufre, nitrógeno y oxígeno. La segunda etapa o Hicrocracking convierte una parte importante del gas oil en productos intermedios valiosos. Esto se consigue procesando la carga en un lecho fijo de catalizador, en presencia de una gran cantidad de hidrógeno, a una elevada presión y temperatura.

Los gases oils provenientes de las unidades de Topping y Vacío llegan a un acumulador de carga. Desde éste lo toma una bomba que lo descarga hacia intercambiadores de calor, donde se precalienta con el efluente de los reactores, pasando a un reactor de hidrotratamiento.

Para evitar el excesivo ensuciamiento en el intercambiador se le inyecta a la carga una pequeña cantidad de hidrógeno. Antes de entrar al reactor la carga precalentada se mezcla con un flujo caliente de hidrógeno.

- Coker: Esta planta es una unidad de Coquización retardada, cuya finalidad es convertir el producto de fondo de bajo valor comercial de las torres de vacío en productos líquidos de alto valor.

El proceso consiste en calentar la carga de pitch y enviarla a una cámara de reacción donde el efluente líquido procedente del horno se convierte en coque y vapores de hidrocarburos. El coque es retenido en la cámara desde donde es retirado posteriormente y los vapores se envían a una torre fraccionadora para la obtención de productos como gas oil, nafta y gases. Por otra parte, el pitch es receptado en el acumulador de carga, desde donde succiona una bomba que envía la carga fresca a intercambiadores en los que recibe el calor del reflujo intermedio de la torre fraccionador ingresando al fondo de ésta.

La coquización retardada es una reacción endotérmica, el calor necesario lo entrega el horno, donde se produce la vaporización parcial y craqueo moderado de la alimentación. El efluente líquido del horno es retenido en la cámara transformándose en coque y vapores livianos de hidrocarburos. Por el tope de la cámara de coque salen los gases y vapores hacia la torre fraccionadora. Las

cámaras funcionan por ciclos de aproximadamente 24 horas, por lo tanto, la cámara que se saca de servicio se barre con vapor para retirar hidrocarburos y luego se enfría con agua. Cuando está fría se abre para efectuar el corte de coque con un sistema de lanza de alta presión. Los hidrocarburos recuperados en el barrido van a una torre de purgas, que tiene un rehervidor de fondo para eliminar el agua presente y recuperar los hidrocarburos que son retornados a la torre fraccionadora.

Los gases de tope salen de la torre fraccionadora, se condensan en los condensadores y llegan a un acumulador de tope donde se separan gases, nafta y agua. Los gases del acumulador de tope fluyen hacia el tambor de succión de un compresor que comprime estos gases ácidos y los descarga hacia un separador de alta presión, pasando previamente por un condensador. Desde este separador los gases son enviados a una torre absorbedor, donde una corriente de diesel recupera el LPG de estos gases y los retorna a la torre fraccionadora, enviando los gases ácidos a la planta de tratamiento de MDEA N°2, donde se elimina el H₂S que contiene y sale hacia el sistema de fuel gas. Del producto condensado en el acumulador de tope, una parte es retornada a la torre por una bomba como reflujo de tope. El producto restante es bombeado hacia el separador de alta presión, antes del condensador. Los gases que salen de este separador retornan a la torre absorbidora y el producto es enviado a un separador de baja presión. Desde este la nafta sale como carga de la Unidad de HDT y el LPG sale por el tope hacia la Unidad de recuperación de livianos. Las aguas del acumulador de tope de la torre y del separador de alta presión son enviadas a la planta de tratamiento de aguas ácidas.

- Cracking catalítico: proceso en el que un catalizador en forma de microesferas craquea moléculas pesadas de hidrocarburo a hidrocarburos de cadena corta. Tiene por finalidad obtener mayor cantidad de hidrocarburos livianos de gran aprecio para la industria. La mayoría de las cargas a las unidades de ruptura catalítica lo constituyen gasóleos y aceites pesados.

El cracking produce naftas de muy alta calidad. Las de menor grado que se obtienen por destilación también pueden mejorarse por el proceso de reformación, modificando la estructura por calentamiento bajo presión generalmente en presencia de un catalizador.

El cracking y la reforma hacen que la refinería pueda responder a los cambios que se producen en la demanda. Las personas a cargo de la programación de la producción se encargan de definir el ruteo de las distintas corrientes obtenidas en la destilación a través de los diversos procesos de conversión, para adecuar la cantidad y calidad de los productos finales, según la demanda.

- HDS: La unidad de Hidrodesulfurización de diesel tiene como objetivo retirar los compuestos azufrados contenidos en la carga, a través del paso del producto por un reactor que tiene cámaras en presencia de hidrógeno que proviene normalmente de la Unidad de Reformación Catalítica, produciendo nafta, diesel y gas ácido.

La carga de diésel de Torre de Vacío o Torre de Vacío 2 más un porcentaje de diésel de cracking catalítico es precalentado con el diésel de estanques antes de llegar a un acumulador de carga. Desde este es succionado por las bombas de carga y en su descarga se unen flujos de hidrógeno provenientes de un compresor de reciclo y del compresor de “make up”, que entrega el hidrógeno que proviene de la unidad de reformación catalítica. La mezcla de producto e hidrógeno es precalentada en cuatro intercambiadores de calor con el producto de fondo en el reactor para después entrar a un horno dividido en dos pasos. Ambas corrientes se juntan en la salida del horno y entran por la parte superior de un reactor catalítico. Dentro de él, una de las camas tiene por función saturar las diolefinas y olefinas presentes en la carga como una forma de proteger la segunda cama de catalizador. La segunda cama está constituida por un catalizador que elimina los mercaptanos, sulfuros, disulfuros y otros compuestos azufrados o nitrificados, formando con el hidrógeno ácido sulfhídrico y amoniaco respectivamente.

A la salida del reactor el efluente baja su temperatura, entregando calor a la carga en intercambiadores de calor, entrando a continuación a un separador caliente. Por el tope de este salen los gases ricos en hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y gases de hidrocarburos, los que luego de enfriarse entran a un separador frío, donde se separa el hidrógeno del diésel.

El producto condensado en el separador frío sale de éste y se precalienta con el diesel a estanque. A continuación, se junta con el producto de fondo del separador caliente entran a un stripper. En el tope de este último salen los hidrocarburos livianos y vapores de agua que, luego de pasar por un condensador, van a un acumulador de tope donde se separa el agua de la nafta. El agua ácida va a otro acumulador junto con el agua proveniente del separador frío, desde donde son enviadas a la Planta de Aguas Ácidas.

Por otra parte, la nafta se separa en dos flujos, donde uno de ellos va como reflujo de tope al “stripper” y el segundo va al acumulador de tope de la torre fraccionadora de la Torre de Vacío 1 o Torre de Vacío 2 para su estabilización. Del tope de este acumulador salen gases que van a la Unidad de Recuperación de Livianos. El diesel producto sale por el fondo del “stripper” y se enfría en una serie de intercambiadores. Posteriormente es enviado a estanque, pasando previamente por un coalescedor.

Por el tope del separador frío sale el gas rico en hidrógeno pasando posteriormente por un separador de gotas, donde por el tope de éste sale el hidrógeno llegando a una torre absorbedora, saliendo hacia el tambor de succión del compresor de reciclo que lo descarga hacia la carga fresca antes de su entrada al horno. El flujo absorbente proveniente de la unidad de tratamiento de Coker o de Cracking catalítico que entra pobre al sistema, sale como producto rico y va regenerar a FCCU o Coker.

El hidro-cracking se define como un proceso químico catalítico utilizado en las refinerías de petróleo para convertir los hidrocarburos constituyentes de alto punto de ebullición de los crudos de petróleo en productos más valiosos de menor punto de ebullición, como gasolina, queroseno, combustible para aviones y diesel oil (Singh Shraddha, y otros, 2013)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según un reporte hecho para 3215 empresas de diferentes sectores industriales en dieciséis países (ABB, 2023), las detenciones no planificadas le cuestan alrededor de 125.000 USD por hora a las empresas, donde el 69% de las encuestadas experimentan al menos una detención no planificada al mes. En el sector de “Oil and Gas” el costo por detención no planificada corresponde a 145.000 USD.

En ENAP refinería Bío-Bío el sistema de bombeo de gasoil con equipos clasificados como semi críticos en el proceso de Hidro-cracking, presenta la función de transportar gasoil del acumulador F-701 hasta el intercambiador de precalentamiento C-702, a no menos de 2400 [m³/d]. En base a los registros, durante el año 2024, en el 57% del tiempo calendario se tiene incumplimiento de su función. El 17% de las causas de su detención corresponden específicamente por fallos del sistema y el restante porcentaje es debido a causas externas a este. El 80% de las causas de fallas del sistema fueron relacionadas a los sellos de las bombas centrífugas involucradas. En términos económicos, esto implica diversos costos asociados, entre los cuales están los de penalización por no producir, costos de mantenimiento y reparación.

Por tanto, el problema corresponde a las detenciones no planificadas que provocan indisponibilidad del sistema. Esto tiene como consecuencia un costo asociado a la penalización por no producción y a los mantenimientos realizados para corregir las fallas.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es rediseñar el sistema de bombeo de combustible en proceso Hidro-Cracking de ENAP refinería Bío-Bío, que mejore el desempeño de parámetros de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) actuales, recomendando configuraciones y acciones de mantenimiento.

Para lograr conseguir el propósito señalado se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el sistema de bombeo de combustible en proceso Hidro-cracking actual, describiendo sus funciones, su configuración lógica de operación y la evaluación del desempeño de parámetros RAM.
- Proponer alternativas para la configuración de la operación del sistema, mediante la modelación y simulación del desempeño de los parámetros RAM usando diagrama de bloques de confiabilidad.
- Realizar una evaluación económica del costo de ciclo de vida (LCC) de las alternativas propuestas.
- Recomendar acciones de mantenimiento mediante derivadas de la aplicación del árbol lógico del RCM en base al historial de vida y simulaciones del comportamiento de los equipos involucrados

PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo se compone de etapas organizadas lógicamente, lo que permite abordar los objetivos propuestos de forma ordenada. El plan se compone de cinco etapas secuenciales (Figura 2), las que se describen a continuación:

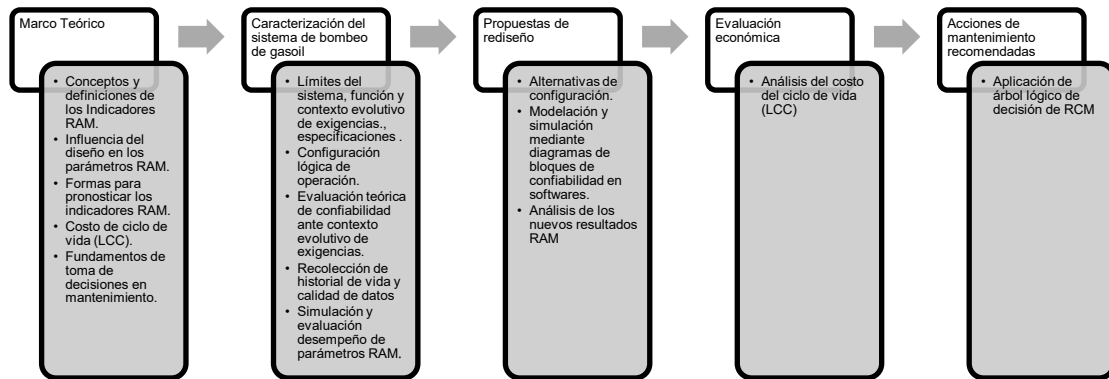


Figura 2. Diagrama de Plan de Trabajo. Elaboración propia

En la primera etapa del plan de trabajo, denominada Marco Teórico, se aborda una investigación teórica y conceptual orientada a comprender los fundamentos de los indicadores RAM, abarcando conceptos, sus definiciones, la influencia que el diseño de un sistema pueda ejercer sobre los indicadores, herramientas de simulación, estimación económica mediante el Costo de ciclo de Vida (LCC) y descripción de herramientas y metodologías para recomendar acciones de mantenimiento, como lo son gráfico Jack-knife y el árbol lógico de RCM (Reliability Centered Maintenance). La finalidad de esta etapa es establecer una base de conocimiento para, a posterior, analizar, modelar el comportamiento del sistema en estudio, realizar la evaluación económica y recomendar acciones de mantenimiento. Los conceptos estudiados se sustentarán mediante revisiones bibliográficas y casos aplicados en la literatura.

La segunda etapa del plan de trabajo corresponde a Caracterización del Sistema de bombeo de gasoil, en la cual se define y describe detalladamente el sistema que es objeto de estudio para comprender su funcionamiento, operación y el contexto

evolutivo de las exigencias operacionales a las que se encuentra sometido. Este análisis permite explicar cómo dichas condiciones conducen a la configuración actualmente existe e incluye la representación clara y completa de la lógica del sistema actual, junto con la identificación de la manera en que el indicador de confiabilidad se ve afectado por este contexto evolutivo de las exigencias operacionales. Se realiza la recolección de información del historial de vida de los equipos involucrados, incluyendo la evaluación de la calidad de los datos recopilados considerando el grado de cumplimiento de los registros recomendados por la norma ISO 14224:2016, con el propósito de cuantificar la incertidumbre asociada y considerarla en la posterior utilización de datos. Posteriormente, se realiza una simulación del desempeño de los indicadores RAM del sistema estudiado. El análisis de estos resultados permite establecer la base del comportamiento actual e identificar oportunidades de mejora, sirviendo como punto de referencia para el análisis comparativo con las configuraciones alternativas propuestas en etapas posteriores.

La tercera etapa del plan de trabajo lleva por nombre Propuesta de Rediseño del Sistema. La finalidad en esta etapa es analizar alternativas de configuración que permitan mejorar el desempeño global en términos de indicadores RAM. Esta etapa incluye la propuesta de diferentes configuraciones, las cuales son modeladas y simuladas mediante Diagramas de Bloques de Confiabilidad para evaluar el comportamiento en un periodo definido. Como resultado de esta etapa, se ejecuta un análisis comparativo de los resultados obtenidos de las simulaciones, con el fin de cuantificar el impacto de cada propuesta y mostrar la mejora relativa a los parámetros RAM.

En la cuarta etapa del plan de trabajo, llamada Evaluación Económica, se realiza la aplicación del LCC tanto para el sistema actual de bombeo de gasoil, como para las alternativas propuestas. En esta etapa se realiza la comparación económica entre las distintas configuraciones estudiadas, evaluando la conveniencia económica de las mejoras propuestas, siendo un complemento al análisis técnico basado en los parámetros RAM. Lo anterior permite obtener una visión integral del sistema, lo que

facilita la toma de decisiones respecto a la alternativa que ofrece un mejor equilibrio entre desempeño operacional y costos asociados.

En la última etapa, Acciones de Mantenimiento Recomendadas, se establecen las acciones de mantenimiento determinadas mediante la jerarquización de modos de falla, utilizando el gráfico Jack-knife y la aplicación del árbol lógico del método RCM, con la finalidad de que las fallas más críticas puedan ser prevenidas eficazmente en los sistemas actual y propuestos. En consecuencia, las recomendaciones constituyen una guía técnica para optimizar la gestión de mantenimiento del sistema, garantizando la sostenibilidad de las mejoras propuestas a lo largo de su vida útil.

1. Marco Teórico

Este capítulo tiene como finalidad establecer el marco conceptual y teórico que se utiliza como base para el desarrollo de este trabajo. En él se abordan cinco pilares fundamentales: Los parámetros RAM, la influencia del diseño en estos indicadores, herramientas de simulación el pronóstico de los parámetros, costo de ciclo de vida (LCC) y la toma de decisiones para el mantenimiento. Todo esto en base a referencias bibliográficas y casos aplicados en la literatura.

Se analizan las definiciones asociadas a los parámetros RAM para tener una base teórica sólida. Se investiga sobre las diferentes configuraciones de componentes y redundancias para analizar de qué manera el diseño del sistema pueden afectar a los indicadores. Se investiga sobre herramientas de simulación que permitan modelar el comportamiento de los sistemas y predecir su desempeño en un periodo de tiempo definido. Se profundiza en el análisis del estudio del LCC para entender la utilidad que tiene como herramienta para la estimación de costos a lo largo de la vida útil de un sistema. Finalmente, se investiga sobre los conceptos y las herramientas necesarias para tomar decisiones para el mantenimiento de sistemas.

1.1 Conceptos y definiciones fundamentales de los indicadores RAM

En esta sección se presentan los conceptos y definiciones fundamentales asociados a los indicadores RAM. Se describen los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, los cuales permiten evaluar el desempeño de sistemas. Además, se incluyen las definiciones de los tiempos asociados, los cuales complementan la interpretación de los resultados y análisis desarrollado en las etapas posteriores del estudio. Una vez establecidos estos conceptos, se presentan también expresiones y funciones matemáticas utilizadas para cuantificar los indicadores RAM.

A continuación, se definen los conceptos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

- Confiabilidad: Se define como la probabilidad de que un componente o sistema realice una función requerida durante un periodo o tiempo determinado cuando se utiliza bajo condiciones de funcionamiento específicas (Ebeling, 1997).
- Disponibilidad: Es definida como la probabilidad de que un componente o sistema esté realizando su función requerida en un momento dado, cuando se utilizan las operaciones especificadas (Ebeling, 1997).
- Mantenibilidad: Se define como la probabilidad de que un componente o sistema que sufre una falla pueda ser restaurado o reparado a una condición específica dentro un periodo de tiempo determinado, cuando el mantenimiento se realiza de acuerdo con los procedimientos prescritos (Ebeling, 1997).

Las definiciones anteriores se estructuran en torno al cumplimiento o incumplimiento de una función requerida. En esta línea, la norma ISO 14224:2016 define la falla como la pérdida de la capacidad de un ítem para desempeñar la función que se requiere. Esta definición implica que el término “falla” no se limita únicamente a un daño físico del ítem, componente o sistema, sino que abarca cualquier situación en la cual este no cumple la función especificada. Por otro lado, la norma anteriormente mencionada define modo de falla como la manera en que ocurre la falla. El autor Moubray, una definición precisa corresponde a cualquier evento que causa una falla funcional (Moubray, 1997)

Por otra parte, para comprender la forma en que se expresan las funciones utilizadas para estimar estos parámetros, es necesario conocer previamente las definiciones de tiempo asociadas al cumplimiento o incumplimiento de la función del sistema. La norma ISO 14224:2016 define, en una línea de tiempo, los distintos intervalos en los cuales un ítem o, en este caso, el sistema analizado, se encuentra cumpliendo o no su función. Estos se presentan en la Figura 3.

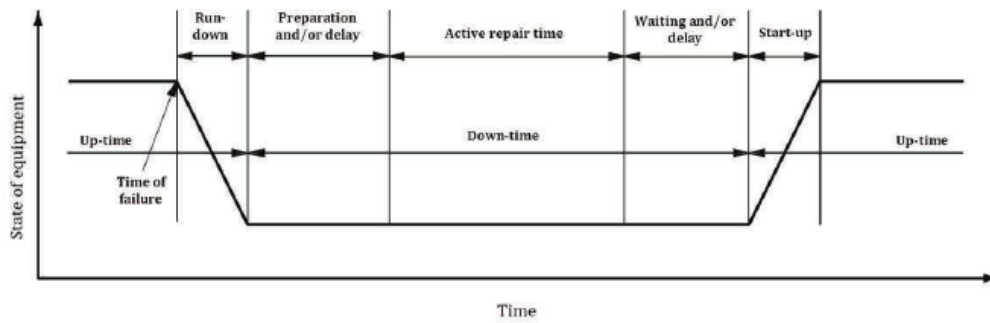


Figura 3. Tiempos de mantenimiento. Fuente: ISO (2016).

De la Figura 3, destacan los siguientes tiempos:

- Up time: Intervalo de tiempo durante el cual un ítem está en un estado donde es capaz de funcionar según lo requerido.
- Down time: Intervalo de tiempo durante el cual un ítem se encuentra en un estado de incapacidad de funcionar como se requiere.

En base los tiempos de cumplimiento o incumpliendo la función del sistema, la norma ISO 14224:2016 establece distintos tiempos medios característicos. Estos son:

- METBF: Tiempo medio transcurrido esperado entre fallas sucesivas de un ítem reparable.
- MTBF: Tiempo medio esperado de operación antes de que ocurra una falla.
- MTTRes: Tiempo medio para la restauración. Esto incluye el tiempo necesario para detectar el fallo, el tiempo transcurrido antes de iniciar la reparación, el tiempo efectivo de reparación y el tiempo transcurrido antes de que el componente esté disponible para volver a ponerse en funcionamiento.
- MTTR: Tiempo medio esperado para completar la reparación de un ítem fallado.
- MTTF: Tiempo medio previsto antes de que el elemento falle.

Además, la norma ISO14224:2016 menciona la ecuación (1) como una aproximación:

$$METBF = MTTRes + MTTF \quad (1)$$

Con respecto a los términos MTBF y MTTF, el autor Pistarelli hace la distinción de que el primero es para equipos reparables, mientras que el segundo se utiliza para ítems no reparables.

La Figura 4 presenta los tiempos medios asociados al Up Time y Down Time, junto con la aproximación propuesta por la norma ISO 14224:2016. Esto permite visualizar y comprender de manera más clara los tiempos medios utilizados en el análisis.

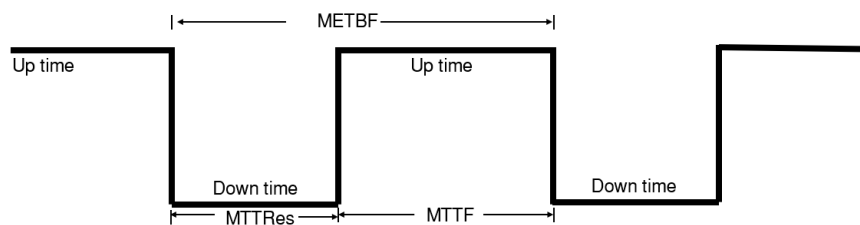


Figura 4. Tiempos medios asociados a Up Time y Down Time. Elaboración propia.

Las distribuciones de probabilidad empleadas para los tiempos de falla se pueden representar según diferentes recomendaciones en la literatura y las características del sistema analizado. Las posibles distribuciones de probabilidad puede ser Weibull, Exponencial, Normal, Log normal, entre otras.

Lo mismo ocurre con los tiempos de reparación, donde el autor Arata recomienda utilizar la distribución probabilística Normal-Logarítmica. Dicho autor señala que esta distribución permite describir adecuadamente la variabilidad de los tiempos de intervención, tanto las fluctuaciones típicas del proceso de reparación como las variaciones de carácter accidental (Arata, 2009). Teniendo los tiempos de reparación para cada falla, es posible obtener el MTTR con la media de los logaritmos de los tiempos de reparación y su varianza relativa.

Una vez modelados los tiempos de falla, es posible definir la tasa de falla (λ). Esta corresponde a probabilidad condicional de que una determinada pieza, habiendo funcionado satisfactoriamente hasta un tiempo t , sufra un fallo en un instante de tiempo siguiente $[t + \Delta t]$ (Pistarelli, 2010).

Una vez modelada las distribuciones de probabilidad de los tiempos de falla y definida la tasa de falla, es posible establecer las expresiones fundamentales que permiten cuantificar los indicadores RAM. Algunas de estas son:

- Confiabilidad mediante distribución exponencial negativa cuando la tasa de falla es constante (Arata, 2009):

$$R(t) = e^{t\lambda} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (2)$$

- Disponibilidad esperada (Arata, 2009):

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

- Mantenibilidad mediante distribución exponencial cuando la tasa de reparación es constante (Ebeling, 1997):

$$M(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (4)$$

Como hacen mención las definiciones que se detallan anteriormente con respecto a estos parámetros, la variable de tiempo t en la fórmula (2) corresponde al periodo en el que se evalúa si es que el componente o sistema realiza la función requerida. Mientras que, para la fórmula (4) la variable t corresponde al periodo en el que se evalúa si es que el sistema o componente puede ser restaurado.

1.2 Influencia del diseño de sistemas en los indicadores RAM

En esta sección se analiza la relación entre el diseño del sistema y el comportamiento de los indicadores RAM, lo cual tiene como finalidad comprender cómo las decisiones de configuración influyen directamente en el desempeño global del sistema, evidenciando que los indicadores estudiados no dependen únicamente de las características individuales de los equipos, sino también de la forma en que estos se interconectan y cumplen su función dentro del sistema.

Se presenta una base teórica de los bloques de confiabilidad y las diferentes configuraciones posibles para modelar el comportamiento del sistema.

1.2.1 Bloques de confiabilidad (RBD)

Por sus siglas en ingles Reliability Block Diagram, los bloques de confiabilidad corresponden una representación del funcionamiento, desde el punto de vista de confiabilidad, mediante la conexión entre sí, donde cada bloque corresponde a un subsistema o componente (Arata, 2009).

A diferencia de la representación física del sistema, los bloques de confiabilidad muestran un diagrama lógico de cómo y cuándo funciona un sistema (Rausand, Barros, & Hoyland, 2021).

Las configuraciones típicas para representar sistemas mediante Bloques de Confiabilidad son: en serie, paralelo y stand-by.

La configuración en serie se presenta cuando todos los componentes deben funcionar para que el sistema funcione (Ebeling, 1997). Es decir, en caso de fallar alguno de estos, el sistema fallará por completo. La representación de esta configuración se presenta en la Figura 5:

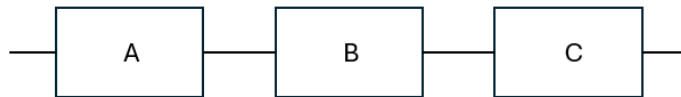


Figura 5. Configuración en serie de diagrama de bloques confiabilidad. Elaboración propia

La confiabilidad del sistema completo corresponde al producto de las probabilidades de éxito de cada uno de los componentes (Arata, 2009).

$$R_S(t) = R_1(t)R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (5)$$

De manera análoga ocurre con el cálculo de disponibilidad del sistema, ya que son las mismas reglas de probabilidad.

$$A_S(t) = A_1(t)A_2(t) \dots A_n(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t) \quad (6)$$

Por otro lado, la configuración es en paralelo o con redundancia, si todas las unidades deben fallar para que falle el sistema. Mientras una o más unidades sigan operando, el sistema continúa funcionando (Ebeling, 1997).

Existen dos tipos de redundancias (Arata, 2009):

- Redundancia total: Un elemento, por sí solo, es capaz de soportar el buen funcionamiento del sistema (Figura 6).

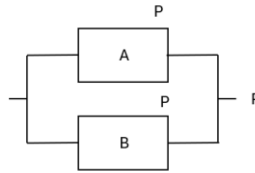


Figura 6. Configuración en paralelo con redundancia total de diagrama de bloques de confiabilidad.

Elaboración propia

Mediante el desarrollo matemático desde el cálculo de la probabilidad de falla acumulada del sistema en paralelo, se tiene que:

$$F_s(t) = F_1(t)F_2(t) \dots F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (7)$$

Por lo tanto, la probabilidad de que el sistema no falle (confiabilidad) es:

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (8)$$

En cuanto a disponibilidad se tiene que:

$$A_s = 1 - \prod(1 - A_i) \quad (9)$$

- Redundancia parcial: un grupo de elementos es capaz de soportar el buen funcionamiento del sistema (Figura 7)

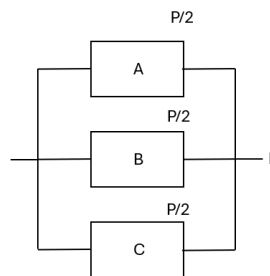


Figura 7. Configuración en paralelo con redundancia parcial de diagramas de bloques de confiabilidad.

Elaboración propia.

Como para este sistema se necesita una combinación mínima de elementos para que funcione su confiabilidad se calcula:

$$R_s = P(r \leq j \leq n) = \sum_{j=r}^n \binom{n}{j} R^j (1 - R)^{n-j} \quad (10)$$

Donde n corresponde número de elementos iguales del sistema, r es el número de equipos mínimo que se necesitan para un buen funcionamiento y R la confiabilidad de cada componente individualmente. La fórmula (10) es válida solo cuando las confiabilidades R de cada componente son idénticas, lo cual en la práctica real no ocurre.

También, existe la configuración en stand-by, la que consiste en que en un instante determinado funciona sólo uno de los elementos del sistema, mientras que los restantes permanecen en reserva, en estado de espera o stand-by (Arata, 2009). La representación corresponde a la de la Figura 8.

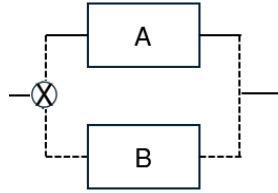


Figura 8. Configuración en stand-by de diagrama de bloques de confiabilidad. Elaboración propia.

Mientras A está funcionando, B está en reserva. En caso de que A falle, entrará en funcionamiento B. La variación de conexión que define el funcionamiento del stand by está dado por un conmutador (Arata, 2009), la cual en la Figura 8 está representado por un círculo con una equis.

Nuevamente, para obtener la probabilidad de funcionamiento del sistema completo se deben evaluar los escenarios de funcionamiento. Como ejemplo, se tiene que: “A” funciona al tiempo $t = T$, es decir, que “A” falla en $t = \lambda$ y “B” funciona desde $t = \lambda$ hasta un tiempo t .

$$R_s(t) = R_A(t) + \int_0^t f_A(\tau) R_B(t - \tau) d\tau \quad (11)$$

Cuando ambas bombas son iguales (cálculo válido cuando ambas bombas tienen la misma tasa de falla y además constantes):

$$R_S(t) = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t) \quad (12)$$

El autor Pistarelli hace una comparativa aplicándolo en un contexto que corresponde a la operación de válvulas para el funcionamiento de un sistema.

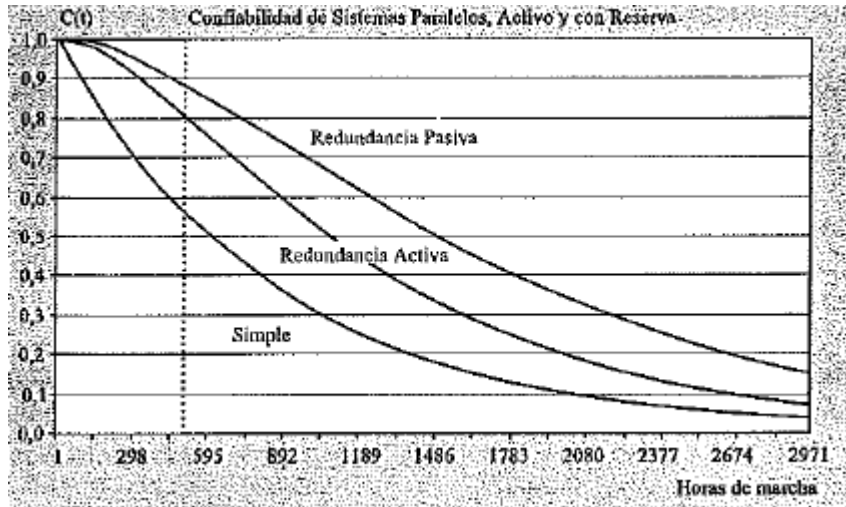


Figura 9. Gráfico de confiabilidad para el sistema simple, redundancia activa y redundancia pasiva (stand-by). Fuente: Pistarelli, A. (2010)

En la Figura 9 se hace la comparativa entre la confiabilidad del funcionamiento de solo una válvula (simple), válvulas en paralelo (redundancia activa) y válvulas en stan-by (redundancia pasiva). Mediante diferentes tasas de falla para las válvulas, se demuestra que el sistema con mayor confiabilidad durante el periodo de estudio corresponde al de redundancia pasiva.

1.3 Formas para pronosticar el comportamiento de los parámetros RAM.

En este subcapítulo se presenta una revisión de estudios previos relacionados con la estimación y proyección de los parámetros RAM. El objetivo es identificar herramientas empleadas en investigaciones similares, que sirvan como referencia para

el desarrollo del presente estudio. A partir de los antecedentes recopilados, se describen las herramientas utilizadas en el pronóstico de los parámetros RAM para un periodo definido.

1.3.1 Estudios previos de estimación y pronósticos de parámetros RAM

En esta sección se revisan las principales formas de cálculo y herramientas utilizadas para estimar y pronosticar los indicadores RAM, tomando como referencia diversos estudios previos que han desarrollado análisis similares. Esta revisión permite establecer una base de referencia que orienta el desarrollo del presente estudio y respalde la selección de los métodos de análisis y simulación aplicados posteriormente.

El primer estudio que se analiza corresponde al que lleva por título “Modelo de confiabilidad con metodología RAM para un sistema de bombeo de agua de inyección” (Buitrago Cuellar, 2018). Este trabajo tiene por objetivo principal el desarrollo de la metodología RAM de manera secuencial para implementarlo en un sistema de bombeo de agua de inyección, la cual participa en la producción secundaria de hidrocarburos (Figura 10).

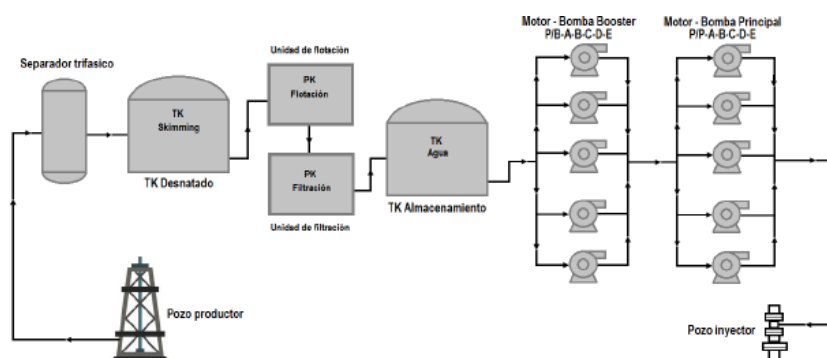


Figura 10. Diagrama del sistema de bombeo de inyección. Fuente: Buitrago Cuellar, F. (2018)

La finalidad es, una vez obtenidos los parámetros de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, optimizar los programas de mantenimiento e inspección. Se tiene como

justificación y motivación que las fallas en equipos de los sistemas de bombeo para la inyección de agua pueden provocar diferentes accidentes, tanto humanos como ambientales, además de las pérdidas económicas por aquellos accidentes. El autor propone una metodología RAM para desarrollar el modelo confiabilidad para el sistema analizado, la que se presenta en la Figura 11.

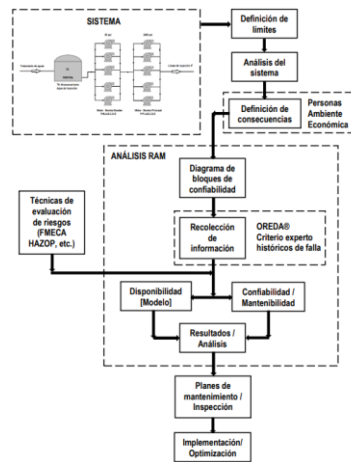


Figura 11. Diagrama de procesos para la metodología RAM. Fuente: Buitrago Cuellar, F (2018).

La metodología en la Figura 11 parte definiendo el sistema de bombeo de inyección, imponiendo como límites el proceso que va desde el estanque de almacenamiento (TK Almacenamiento) hasta justo después de las bombas principales, lo cual corresponde a la línea de inyección.

Una vez definido los límites, se deben analizar qué equipos y componentes conforman el sistema, evaluando las consecuencias económicas, medioambientales y en las personales que se tendría en caso de alguna falla en el sistema considerado.

Posteriormente, empieza el análisis RAM desarrollando el diagrama de bloques de confiabilidad, debido a que este corresponde un proceso complejo. El diagrama representa al sistema definido anteriormente mediante la consideración de equipos que lo conforman (Figura 12).

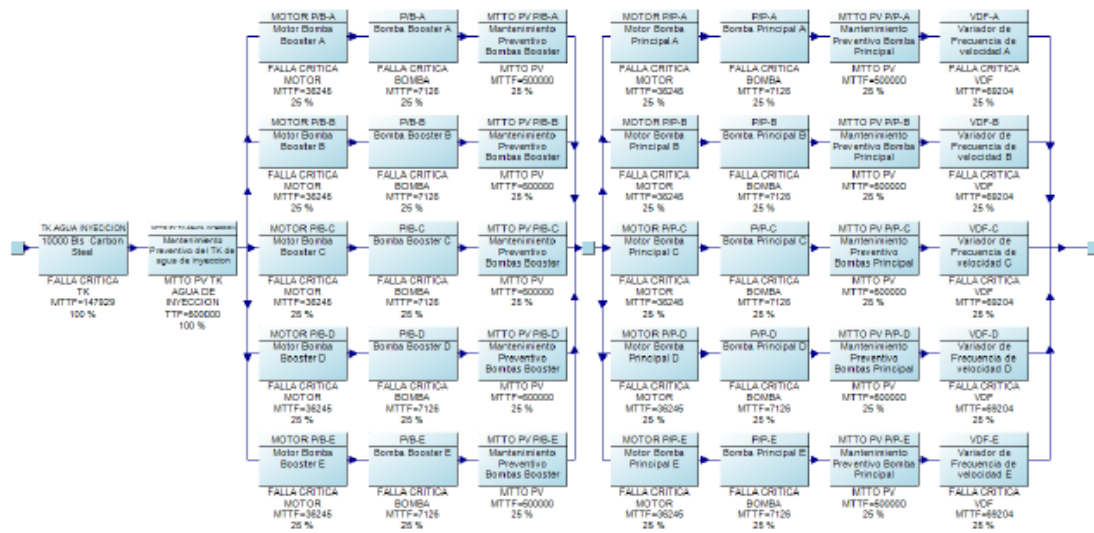


Figura 12. Diagrama de bloques de confiabilidad cargado para el modelo. Fuente: Buitrago Cuellar, F. (2018).

El diseño de este sistema corresponde a un tanque de agua, la cual es succionada hacia un conjunto de bombeo de agua de inyección mediante un arreglo en paralelo de Bombas Booster (P-A/B/C/D/E), donde cuatro operan y la quinta corresponde a una Standby. Este subsistema tiene como finalidad suministrar la altura de carga requerida por las bombas principales en su succión. El arreglo de estas últimas bombas (P/P-A/B/C/D/E) corresponde a cuatro de estas operando, mientras que otra está en Standby, mediante las cuales se entrega el agua de inyección.

Entendiendo el sistema y su composición, empieza la recopilación de información mediante bases de datos, criterios de expertos e historial de falla y mantenimiento (OREDA), así como también investigación sobre las técnicas de evaluación de riesgos (FMECA y HAZOP).

Se deben tener los datos necesarios para calcular el tiempo medio entre fallas (MTBF), tasa de falla, tiempo promedio para reparar (MTTR) y la tasa de reparación. Estos valores se ingresan al software de simulación Availability Workbench, el cual mediante el método de Monte Carlo es capaz de predecir el comportamiento de los parámetros RAM en el tiempo.

La Figura 13 muestra los indicadores de confiabilidad por componente.

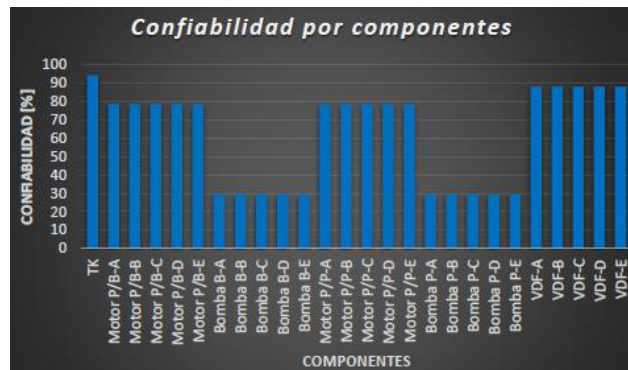


Figura 13. Confiabilidad por componentes para t=8760 h.Fuente: Buitrago Cuellar (2018)

Como muestra la Figura 13, la simulación para obtener la confiabilidad durante el periodo de un año (8760 horas) entregó que, en términos de confiabilidad, la mayor la tiene el tanque de agua (94,25%) y la menor las bombas centrífugas (29,25%). La justificación del autor es que el tanque presenta modos de falla por corrosión, donde las tasas de falla es de menor magnitud que el resto de componentes. Por otra parte, las bombas centrífugas son las más críticas en términos del indicador de confiabilidad debido a su naturaleza dinámica y factores de vibraciones, desgaste y falla de lubricación, las cuales presentan tasas de fallas de mayor magnitud. En base a esto último, el autor recomienda presentar mayores esfuerzos y recursos de mantenimiento a las bombas centrífugas.

La Figura 14 muestra la disponibilidad por subsistemas en un tiempo modelado de treinta años.

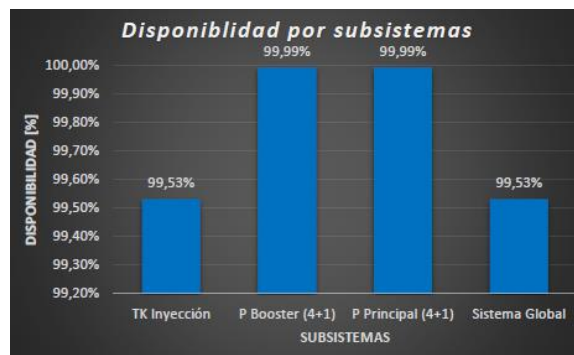


Figura 14. Disponibilidad por subsistemas. Fuente:Buitrago Cuellar, F. (2018).

Los valores mayores corresponden a los subsistemas de bombeo y principal, donde el autor señala que es debido a las redundancias y componentes en Standby.

La Figura 15 muestra la mantenibilidad de cada componente para un intervalo de tiempo correspondiente a cuarenta horas, guiándose por las horas de reparación de cada modo de falla de acuerdo a OREDA.

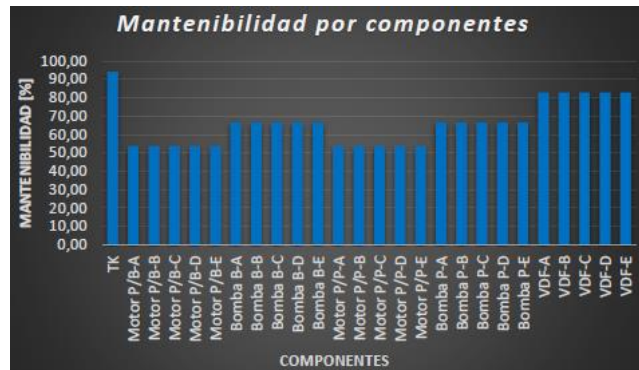


Figura 15. Mantenibilidad de componentes para intervalo de 40 horas. Fuente: Buitrago Cuellar, F. (2018).

La mantenibilidad de los motores (53,53%) y las bombas centrífugas (66,48%) hacen que el autor recomiende aumentar los esfuerzos de entrenamiento de personal de mantenimiento y stock de repuestos para motores y bombas para aumentar la mantenibilidad del sistema.

En base a los modos de falla encontrados, efectos y causas de estas, jerarquización de riesgo, y aplicando el formato HAZOP, es que el autor propone planes de mantenimiento optimizados en las frecuencias y duración de tareas gracias a los valores cuantitativos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

El segundo estudio que se analiza corresponde al que lleva por nombre “Pronóstico de la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad mediante la norma ISO 3997-9 para optimizar la operación y mantenimiento del ascensor de facultad mecánica” (Allauca Caisaguano & Cullay Ashqui, 2017). En este trabajo se realizan pronósticos de los parámetros RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Security) mediante la construcción de diagramas de bloques para los diferentes

subsistemas que conforman el ascensor analizado. La finalidad de este trabajo es identificar los equipos y sistemas críticos, donde se proponen acciones de mitigación. En ellos, se presentan componente mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Un ejemplo de ello es el subsistema eléctrico que los autores detallan en la Figura 16.

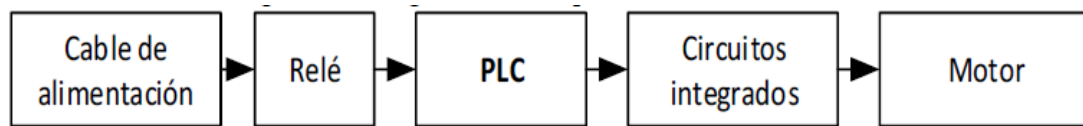


Figura 16. Diagrama de bloques, sistema eléctrico. Fuente: Allauca Caisaguano & Cullay Ashqui (2017)

Gracias a la configuración de los diagramas de bloques y las fórmulas asociadas es que se pudo obtener la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para tiempos específicos. Para el primer y segundo parámetro se pudo obtener para cada subsistema total, mientras que la mantenibilidad solo se obtiene para cada componente del subsistema. La disponibilidad total del ascensor se hizo mediante el método de Montecarlo ejecutado por el software RStudio.

Las predicciones se hicieron semestral, anual y a un tercer año para cada subsistema mecánico, eléctrico, donde los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad presentaron valores de probabilidad mínimamente de un 70%.

En base a los valores RAMS obtenidos y a los árboles de falla se realizan las rutas críticas de los elementos involucrados, generando planes de mantenimiento.

De este trabajo se destaca el uso de OREDA para tenerlo presente como fuente de información para equipos que no tienen un historial.

Otro estudio que se revisa corresponde al que lleva por título “Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study on reciprocating compressors API618” (Corvaro, Giacchetta, Marchetti, & Renacati, 2017). Este trabajo, enmarcado en la industria del Petróleo y Gas, tiene como objetivo principal evaluar la disponibilidad de una planta de compresores reciprocantes, la cual debiese tener un mínimo de 96% de disponibilidad en su producción normal. Asimismo, se busca identificar los equipos y

subsistemas que más afectan la indisponibilidad y proponer soluciones de optimizaciones rentables que aseguren el cumplimiento del nivel de disponibilidad.

Este último trabajo, el cual se realiza en colaboración con una empresa llamada RC, se propone una metodología RAM para llevar a cabo los objetivos.

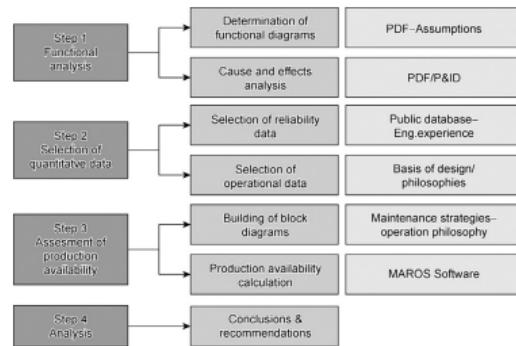


Figura 17. Esquema de la metodología RAM (esquema proporcionado por la empresa RC).Fuente: Corvaro, Giacchetta, Marchetti, & Renacati (2017)

La Figura 17 recomienda, primero realizar un análisis de funcionamiento del equipo, junto con uno de causa y efecto. Seguido a eso, hacer una selección sobre datos relacionados con la confiabilidad. Posteriormente, realizar una construcción de diagrama de bloques de cada uno de los componentes y finalmente, calcular la disponibilidad del conjunto completo.

Se detallan tres pasos que están relacionados entre sí para obtener resultados numéricos de la simulación RAM en la Figura 18:

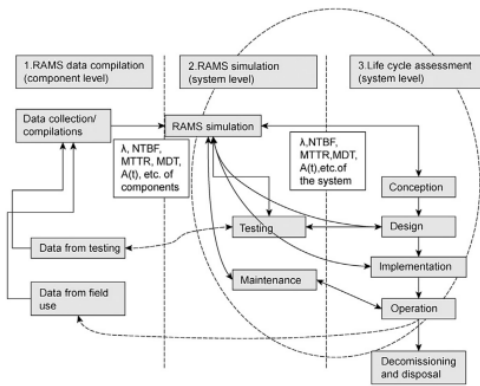


Figura 18. Esquema de los pasos del RAMS y evaluación del ciclo de vida (esquema proporcionado por la empresa RC).Fuente: Corvaro, Giacchetta, Marchetti, & Renacati (2017)

El primer paso corresponde a la recopilación de datos sobre fallas de componentes del compresor, para así tener datos acerca de confiabilidad del equipo. Estos serán útiles para la posterior simulación RAM.

El segundo paso corresponde a la simulación, la cual tiene por objetivo modelar el sistema en términos de confiabilidad. Es decir, a partir de valores de tasa de falla, MTBF (tiempo medio entre fallas), MDT (tiempo fuera de servicio) y otros parámetros para cada uno de los componentes del equipo, ser capaz de obtener los mismos parámetros, pero mientras interactúan entre sí (como sistema) y el entorno. Esta simulación y análisis se realizó mediante el método de Monte Carlo y el software MAROS.

Finalmente, el tercer paso corresponde a la evaluación del ciclo de vida a nivel sistema, teniendo en cuenta los costos y los ingresos con el objetivo de evaluar los beneficios.

A partir de la recopilación de datos sobre fallas de los subsistemas y equipos más críticos asociados a los compresores, se determina que los que tienen mayor criticidad corresponden al cojinete de empuje y al motor eléctrico respectivamente.

La simulación se hace en base a 10 ciclos con una vida útil de 20 años, obteniendo una eficiencia de producción promedio del 97,8%. La frecuencia de interrupciones es en promedio 11,47 por año con una duración de 12,339 horas cada una. Por las fallas hubo, en promedio, una pérdida de volumen de producción de 9.980.840 sm³ en los 20 años.

Estas conclusiones dan a la empresa una oportunidad de mejora de mantenimiento, mediante el respaldo numérico de simulación de parámetros RAM.

De la revisión de los estudios previos, se destacan varios aspectos relevantes para el desarrollo del presente trabajo. En primer lugar, se evidencia la importancia de contar con el historial de vida de los componentes que conforman el sistema a analizar, ya que estos datos permiten estimar con mayor precisión los parámetros RAM. En los casos donde no se dispone de dicha información, diversos autores sugieren el uso de base de datos de referencia, como el manual de OREDA.

En segundo lugar, se observa que la estimación de los parámetros RAM puede abordarse mediante dos enfoques principales: el uso de formulaciones matemáticas tradicionales o la aplicación de métodos probabilísticos, entre los cuales destaca la simulación de Monte Carlo. Asimismo, se identifican herramientas computacionales especializadas que integran este enfoque probabilístico, permitiendo obtener los parámetros RAM a partir de la definición de funciones de probabilidad y parámetros característicos de los modos de falla, generando resultados proyectados.

1.3.2 Herramientas para obtener y pronosticar el comportamiento de los parámetros RAM

En esta sección se presentan las herramientas y formulaciones matemáticas empleadas para la estimación y proyección del comportamiento de los parámetros RAM. La selección de estas herramientas y métodos se fundamenta tanto en las prácticas observadas en los estudios previos realizados (los cuales abordan problemáticas análogas a las desarrolladas en este trabajo) como en las recomendaciones de la literatura especializada para realizar aproximaciones y estimaciones adecuadas en los indicadores.

OREDA (The Offshore Reliability Data) corresponde a un proyecto hecho por diferentes participantes relacionados en el área de petróleo y gas para tener acceso a datos RAMS en equipos, destacando las tasas de fallas y reparación en equipos que

están presentes en los procesos de los participantes involucrados. Los resultados que plasma OREDA son obtenidos mediante métodos estadísticos detallados en su libro.

Taxonomy no		Item									
Population	Installations	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)						No of demands			
		Calendar time *			Operational time †						
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)					Active rep.hrs	Repair (manhours)			
		Lower	Mean	Upper	SD	n/c		Min	Mean	Max	
Comments											

Figura 19. Formato de las tablas de confiabilidad. Fuente: OREDA Participants (2002)

De la Figura 19 OREDA detalla los siguientes términos y definiciones:

- Taxonomy number and ítem: Identificación numérica del ítem mediante un orden jerárquico impuesto en el proyecto.
- Population: Número total de ítems que forman la base para las estimaciones.
- Installations: Número total de instalaciones (plataformas) cubiertas por la vigilancia de datos para el ítem en cuestión.
- Aggregated time in service: Tiempo en servicio, el cual se separa en tiempo calendario (tiempo entre inicio y fin de recolección de datos) y tiempo de operación (tiempo donde ítem desarrolla su función requerida).
- Number of demands: Número acumulado de demandas/ciclos para el número total de ítems cuando están disponibles.
- Failure mode: Descripción de la forma en que se produjo el fallo cuando se dispone de dicha información.
- Number of failures: Número total de eventos de fallo por cada modo de fallo. En All mode se presenta un número acumulado de fallos.
- Failure rate: Las columnas de tasa de fallos presentan estimaciones para la tasa de fallos para cada modo de fallo.
- Mean: Estimación de la tasa media de fallos con respecto al modo de fallo especificado.

- Lower, upper: Intervalo de incertidumbre del 90% para la tasa de fallos.
- SD: Desviación estándar que indica la variación entre las múltiples muestras.
- n/τ : El número total de fallos dividido por el tiempo total en servicio.
- Active repair time: El tiempo medio en (en horas) necesario para reparar y devolver al artículo en un estado en el que esté listo. Este tiempo no incluye el necesario para apagar la unidad, esperar las piezas de repuesto, poner en marcha tras reparación, etc.
- Repair (manhours): Presenta tres, donde el valor mean es un promedio de horas hombre registradas para reparar la avería y restablecer el funcionamiento. Los min. y máx. son el número más bajo y alto de horas hombre registradas para la reparación del elemento.
- Comments: cuando esté disponible la probabilidad de fallo bajo demanda se indica en los comentarios.

Para la estimación de los indicadores RAM, se presentan dos softwares:

- Reliasoft: Este software permite realizar análisis de datos de falla utilizando diversas distribuciones de probabilidad. La herramienta está diseñada para trabajar tanto con los datos completos como con datos censurados, incluyendo los denominados tiempos hasta el fallo con suspensiones, donde el término “suspensión” corresponde a unidades que no han fallado dentro del periodo observado.

El software incorpora una función, mediante el módulo Distribution Wizard, para ajustar distribuciones de probabilidad al historial de cada modo de falla. Esta herramienta genera un ranking de distribuciones candidatas mediante los criterios de Kolmogorov-Smirnov, Coeficiente de correlación y Log-verosimilitud. El software asigna ponderaciones internas a cada criterio para determinar una desviación global, seleccionando como mejor opción la distribución que exhibe el menor valor de desviación total. De esta forma, Reliasoft permite determinar la distribución de probabilidad y los parámetros

estadísticos que mejor describen el comportamiento de los modos de falla evaluados.

Además, Reliasoft permite estimar los parámetros característicos de una distribución de probabilidad mediante la selección de dicha distribución y el ingreso de un conjunto de datos asociados.

- Availability Workbench: El módulo Avsim de este software permite realizar simulaciones de confiabilidad y disponibilidad mediante el método probabilístico de Monte Carlo. La herramienta posibilita evaluar Diagramas de Bloques de Confiabilidad en distintos horizontes temporales y con un número configurable de iteraciones.

El método de Monte Carlo se basa en el uso de números aleatorios y en poder llegar a describir el comportamiento de un sistema o explicar un fenómeno difícil de comprender y de presentar analíticamente (Orozco Hernandez, Olaya Flórez, & Restrepo Parra, 2014). En el contexto de confiabilidad, el método de Monte Carlo imita el historial de fallos y reparaciones de los componentes y del sistema utilizando las distribuciones de probabilidad de las duraciones del estado de los componentes (Singh & Mitra, 1995).

En Avsim, cada bloque del Diagrama de Bloques de Confiabilidad debe asociarse a los parámetros y distribuciones probabilísticas que caracterizan a su modo de falla, definiendo así los estados de funcionamiento y falla del sistema. El software permite estructurar el sistema mediante conexiones y nodos configurables, lo que posibilita representar con precisión su lógica operativa.

Los resultados de los parámetros que entrega el Availability Workbench son:

- MTBO: Tiempo medio entre dos interrupciones consecutivas del sistema. Este parámetro es, por lo tanto, el METBF que indica la norma ISO 14224:2016.
- MTTR: Tiempo medio que tarda el sistema en volver a funcionar tras una interrupción, es decir, retomar el cumplimiento de la función.
- F: Refiere a la probabilidad de que el sistema no haya cumplido la función del sistema al menos una vez durante su vida útil. Por lo tanto, la resta de

100% menos F dará como resultado de confiabilidad cuantificada como porcentaje.

- Mean unavailability: Fracción de tiempo prevista en la que el sistema no cumplirá su función a lo largo de su vida útil calculado como el tiempo total que está fuera de servicio dividido por la vida útil total del sistema. La disponibilidad sería la resta de 100% menos este término.
- No of outages: Número de veces que el sistema durante la simulación no cumple la función del sistema.

1.4 Costo de ciclo de vida (LCC)

En esta sección se las principales conceptos y definiciones para tener una comprensión clara sobre el costo de ciclo de vida de un activo. Se introduce el modelo de Woodward, que es un método para estimar el LCC, sentando una base sólida para la comparación económica entre diferentes diseños de sistemas.

1.4.1 Conceptos relacionados al LCC

La norma ISO 15663:2021 define conceptos con respecto al ciclo de vida y costos en la industria del petróleo y el gas natural:

- Ítem: Objeto de estudio. Puede ser una pieza individual, un componente, una subunidad, un equipo, un sistema, una planta o una instalación.
- Activo: Ítem, cosa o entidad que tiene valor potencial o real para una organización.
- Ciclo de vida: Serie de etapas identificables por la que pasa un ítem, desde su concepción hasta su eliminación.
- Costo de ciclo de vida (LCC): Costo total incurrido durante el ciclo de vida.
- Análisis del costo de ciclo de vida: Evaluaciones y cálculos sistemáticos realizados para evaluar opciones competidoras utilizando medidas de evaluación económicas como parte del cálculo del coste del ciclo de vida.

- Cálculo del coste del ciclo de vida: Proceso de evaluación de la diferencia entre el coste del ciclo de vida de dos o más opciones.

1.4.2 Modelo de Woodward

Para realizar el cálculo y el análisis del ciclo de vida de los costes se ocupará el modelo de Woodward (Woodward, 1997). En base a este modelo, es que la literatura ha podido plasmar una fórmula (29) para calcular el costo de ciclo de vida del activo. Según detalla Parra y Crespo, se tiene que:

$$CTCP(P) = \sum_{T=1}^T CI + CO + CMP + TCPf + CMM \quad (13)$$

Donde:

- $CTCP(P)$: Costos totales del ciclo de vida en valor presente (P), para una tasa de descuento (i) y un periodo de vida útil esperado.
- CI : Costo inicial de adquisición e instalación, normalmente dado en valor presente.
- CO : Costos operacionales, normalmente dado como valor anualizado.
- CMP : Costos de Mantenimiento Preventivo, normalmente dado como valor Anualizado.
- $TCPf$: Costos totales por confiabilidad (costos por fallos), normalmente dado como valor anualizado. En ese caso, se asume la tasa de fallo constante, por lo cual el impacto en costes es igual en todos los años.
- CMM : Costos de mantenimiento mayor-especiales, normalmente dado como valor futuro.

Para llevar cada uno de los costos a valor presente se calcula como:

$$CP = CP_0 * \frac{(1+i)^T - 1}{i * (1+i)^T} \quad (14)$$

Donde:

CP : Costo anual en valor presente.

CP_0 : Costo anual del valor en el año 0.

i : tasa de descuento.

T : años de vida útil esperada.

Al costo por falla se le adjudicará el costo por mantenimiento y la penalización por no producción:

$$TCPf = TCPf_m + TCPf_{np} \quad (15)$$

Con:

$TCPf_m$: Costo de mantenimiento por modo de falla.

$$TCPf_m = C_f * \delta_f \quad (16)$$

C_f : Costo por falla.

δ_f : frecuencia de falla.

$TCPf_{np}$: Costo por penalización de no producción.

$$TCPf_{np} = (P_{BC} * MTTR_{sistema} * F_{año} * C_{BC}) + (P_{DT} * MTTR_{sistema} * F_{año} * C_{DT}) \quad (17)$$

P_{BC} : Proporción de bajada de carga.

$MTTR_{sistema}$: Tiempo medio de reparación del sistema.

$F_{año}$: Fallas por año del sistema.

C_{BC} : Costo bajada de carga.

P_{DT} : Proporción de detención total.

C_{DT} : Costo de detención total.

1.4.3 Ahorro de costos y payback

Para hacer la evaluación económica y ver el periodo de recuperación de inversión se necesita, por lo general, ingresos y egresos monetarios. En el contexto de la industria

petrolera es muy difícil cuantificar un ingreso monetario que tiene un sistema que pertenece solo a un porcentaje de todo el proceso de refinación. Por lo tanto, se introducen los términos Ahorro de costos y Payback.

En esta oportunidad, el término ahorro de costos corresponde a la diferencia del valor del LCC entre los sistemas que se quieran evaluar. Es decir, cuanto más costó un sistema en comparación al otro. Como fórmula, se representa por (30):

$$Ahorro = LCC_{Sistema A} - LCC_{Sistema B} \quad (18)$$

Por payback o periodo de recuperación de inversión inicial en este trabajo se refleja como el plazo en que el ahorro de costos acumulado iguala a la inversión inicial de un sistema analizado que se tenga como referencia.

1.5 Fundamentos para la toma de decisiones de mantenimiento

En esta sección se presentan las bases teóricas para tener una metodología estructurada de toma de decisiones en mantenimiento, lo cual permite establecer acciones de mantenimiento para mejorar el desempeño global del sistema.

Se presenta el gráfico Jack-knife, el cual jerarquiza los modos de falla en función de su influencia en los indicadores RAM. Esto tiene como finalidad la priorización de esfuerzos de mantenimiento sobre aquellos modos de falla que generan un mayor impacto.

Además, se plasman los conceptos y definiciones más importantes sobre el árbol lógico del RCM (Reliability Centered Maintenance), herramienta que permite identificar qué tareas son más efectivas para mantener la funcionalidad del sistema considerando la criticidad de los modos de falla y la influencia en los indicadores RAM.

1.5.1 Tipos de mantenimiento

Siguiendo nuevamente con la norma ISO 14224:2016, esta define los siguientes mantenimientos.

- Mantenimiento correctivo: mantenimiento efectuado tras la detección del fallo para reestablecerlo.
- Mantenimiento preventivo: mantenimiento llevado a cabo para mitigar la degradación y reducir la probabilidad de falla.
- Mantenimiento basado en condiciones (CBM): mantenimiento preventivo basado en la evaluación de la condición física.
- Mantenimiento de oportunidad: mantenimiento de un ítem que se aplaza o adelanta en el tiempo y se realiza cuando surge una oportunidad no planificada.
- Mantenimiento predictivo: Mantenimiento basado en la predicción del estado futuro de un elemento estimado o calculado a partir de un conjunto definido de datos históricos y parámetros operativos futuros conocidos.

1.5.2 Gráfico Jack-knife

Esta herramienta lo que permite es, a partir del gráfico, identificar los modos de falla que mayor tasa de falla y tiempo medio de reparación tiene el equipo analizado, identificando además la indisponibilidad promedio de este.

En el eje de las abscisas se tiene la tasa de falla y en el eje de las ordenadas se ubica el tiempo medio de reparación. Se divide en cuatro cuadrantes, donde cada uno indicará el nivel de atención y preocupación en las acciones de mantenimiento necesario para solucionar las fallas. Los niveles corresponden a (Figura 20):

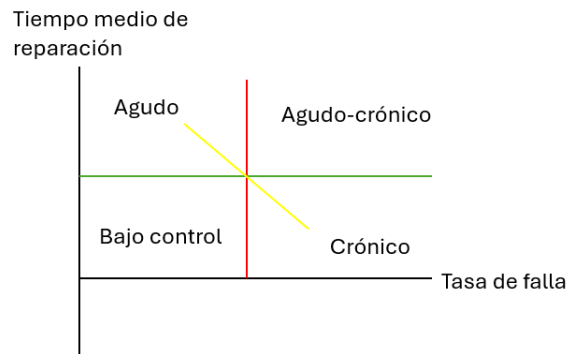


Figura 20. Método gráfico Jack-knife. Elaboración propia.

- Agudo crónico: Los modos de falla ocurren muy a menudo y tardan mucho tiempo en ser reparado.
- Agudo: Los modos de falla no ocurren con gran frecuencia, pero para su reparación hay que invertir mucho tiempo.
- Bajo control: Los modos de falla ocurren rara vez y son rápidos de solucionar
- Crónico: Los modos de falla ocurren con gran frecuencia, pero su reparación es rápida.

La indisponibilidad promedio se representa por una línea que cruza con la intersección del tiempo medio de reparación y la tasa de falla promedio. Los sub cuadrantes generados que están por sobre esta línea divisora representa los modos de falla que generan mayor indisponibilidad.

1.5.3 Árbol lógico de decisión RCM

El RCM, según la norma SAE JA1012, corresponde a un proceso para identificar las políticas que deben ser implementadas para el manejo de los modos de falla que causan falla funcional de cualquier activo físico en un contexto operacional.

Esta herramienta lo que hace es proponer un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento según su contexto operacional en base a las respuestas de 7 preguntas (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2012):

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de ejecución asociados con el activo en su actual retorno de operación?
2. ¿En qué forma falló el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional?
3. ¿Qué causa cada fallo funcional?
4. ¿Qué ocurre cuando sucede un fallo?
5. ¿Cómo impacta cada fallo?
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo funcional?
7. ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea de prevención adecuada a este fallo?

Las fases de este corresponden a:

- Formación del equipo natural de trabajo: Definir grupo de trabajo que pueda definir las siete preguntas del RCM. Se debe incluir personal de operación, mantenimiento, ingeniero de procesos, especialista externo y facilitador (experto en RCM).
- Selección de sistemas: Determinación de instalaciones, parte o elementos a estudiar. Delimitar el sistema a detalle.
- FMEA:
 - Definición de funciones: Identificar funciones primarias, secundarias, protección, control y subsidiarias.
 - Definir fallos funcionales: Determinar cómo es que el activo deja de cumplir sus funciones.
 - Identificar modos de fallos: Encontrar las causas físicas que provocan fallos funcionales.
 - Efectos y consecuencias de los fallos: Responder a cómo se evidencia el fallo, cómo podría afectar la ocurrencia de cada modo de falla a la seguridad o al ambiente y cómo la ocurrencia de cada modo de falla a la producción y las operaciones.

- Aplicación de la lógica RCM: Esta fase corresponde a la selección de las estrategias de mantenimiento mediante un árbol lógico de decisión (Figura 21).

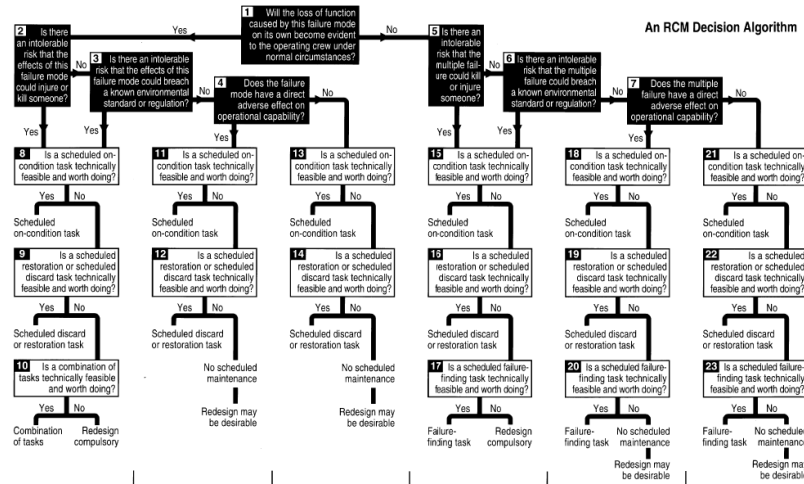


Figura 21. Árbol de decisión de RCM. Fuente: SAE (2002)

Para los modos de falla seleccionados se debe responder preguntas relacionadas a los efectos y consecuencias de estos. Finalmente, se decide la estrategia de mantenimiento más adecuada. Las tareas para llevar a cabo estas estrategias corresponden a (SAE, 2002):

- Tareas basadas en condición: Se pueden desarrollar casi siempre sin mover el activo desde su posición de instalación y normalmente mientras está en operación. Generalmente son más fáciles de organizar. Se identifican las condiciones de las fallas potenciales para que las acciones correctivas estén claramente definidas antes de que comience el trabajo.
Con la detección de la falla pueden ser detectadas bajo condiciones normales y en base a esto se pueden tomar acciones programadas (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2012).
- Tarea de desincorporación y restauración programada: Los elementos deben estar detenidos y se envían al taller. Reemplazo de componentes o partes usadas de un activo a un intervalo temporal inferior al de su vida útil.

- Rediseño: Cambio de las especificaciones de un componente, agregar un nuevo elemento, reemplazar una máquina completa por una fabricada de otra manera o de otro tipo, o una relocalización de una máquina.

La opción de seleccionar una estrategia de rediseño se convierte en un proceso de justificación económica para cuando no se logra alcanzar una actividad de mantenimiento preventiva efectiva (Parra Márquez & Crespo Márquez, 2012).

2. Caracterización del sistema de bombeo de gasoil

En el presente capítulo se desarrolla la caracterización técnica y funcional del sistema de bombeo de gasoil actual, con el propósito de establecer una base sólida para el análisis de su desempeño en términos de los parámetros RAM. Esto permite comprender el funcionamiento actual del sistema, las condiciones bajo las cuales opera y las oportunidades de mejora que motivan el desarrollo de este trabajo.

Primero, se realiza la definición del sistema y sus límites, con el objetivo de delimitar claramente el alcance del análisis y precisar qué equipos forman parte de él. A partir de esta delimitación, se presenta una descripción general del sistema en la que se explica su función principal dentro del proceso de refinación. Asimismo, se detallan las características y especificaciones técnicas de algunos de los equipos que lo conforman. Esta descripción tiene como finalidad ofrecer una visión integral de la estructura y funcionamiento del sistema analizado. Además, se incorpora el contexto evolutivo del sistema actual de bombeo de gasoil, describiendo su configuración original frente al aumento de las exigencias operacionales, con el fin de comprender cómo dichos cambios motivaron el rediseño actual del sistema y el impacto resultante en su indicador de confiabilidad.

Después, se aborda la configuración lógica del sistema, exponiendo la forma en que los distintos equipos se interconectan para cumplir con la función operativa establecida. La comprensión lógica del sistema se representa mediante Diagramas de Bloques de

Confiabilidad, aplicando los principios teóricos asociados de esta herramienta. El objetivo es modelar el sistema estudiado para las posteriores simulaciones, facilitando las evaluaciones de desempeño.

Posteriormente, se describe el proceso de recolección de historial de vida de los equipos, incluyendo la identificación de las fuentes de información. Se evalúa la calidad de los datos en base a las recomendaciones de la norma ISO 14224:2016. No obstante, en aquellos casos donde la información no se encuentra completa o no cumple con los criterios recomendados, se definen suposiciones fundamentadas y se establecen consideraciones específicas para el modelamiento de la posterior simulación. Asimismo, se explicitan los criterios metodológicos que guían el uso de las herramientas de simulación empleadas, detallando la forma en que los softwares son aplicados. Esta etapa resulta fundamental, ya que el historial de vida y las suposiciones adoptadas constituyen la base para estimar los parámetros RAM.

Finalmente, se procede tanto al análisis de los datos históricos del sistema de bombeo de gasoil actual como a la simulación de parámetros RAM de estos. En conjunto, estos resultados permiten caracterizar cuantitativamente el desempeño del sistema y establecer una base que sirve de referencia para comparar las configuraciones alternativas que son propuestas posteriormente.

2.1 Descripción general del sistema de bombeo de gasoil actual

En esta sección se definen los límites del sistema de bombeo de gasoil, lo que permite situarlo dentro del contexto operativo de la planta, delimitando los equipos incluidos en el análisis. A partir de esto, se describe la función principal del sistema. Seguidamente, se describen algunos de los equipos con el propósito de ofrecer una visión más amplia del funcionamiento de este. Se incorpora el contexto evolutivo del sistema, presentando cómo ha cambiado su configuración a lo largo del tiempo y las razones que motivaron dichas modificaciones.

La descripción general del sistema analizado establece las bases para, a posterior, realizar una representación mediante Diagramas de Bloques de Confiabilidad y hacer la evaluación de los parámetros RAM a través de simulaciones.

2.1.1 Definición de límites y función del sistema de bombeo de gasoil

El sistema analizado corresponde al sistema de bombeo de gasoil ubicado en la unidad de Hidro-cracking (HCK). El estudio se realiza con la finalidad de presentar una base para, en un futuro, realizar análisis de parámetros RAM de la misma manera, pero en sistemas a mayor escala.

La representación de la disposición física del sistema analizado se muestra en la Figura 22.

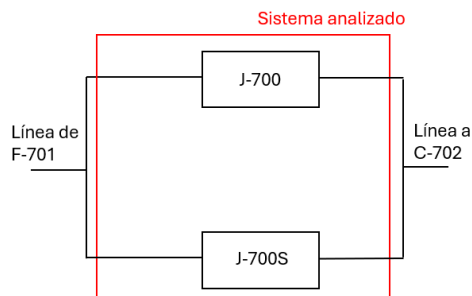


Figura 22. Representación de disposición física del sistema de bombeo de gasoil en HCK. Elaboración propia.

Dentro de los límites impuestos por el cuadrado rojo en la Figura 22 se incluyen los subsistemas J-700 y J-700S, los cuales corresponden bombas centrífugas (TAG J-700 y J-700S), sus sistemas de lubricación y sus motores respectivamente.

Según detalla el manual de operaciones de Hidro-cracking (Jara Leal & Villanueva Cruz, 2005), al sistema analizado le llega gasoil proveniente del acumulador F-701. Esto último se realiza gracias a la succión que realizan las bombas J-700 y J-700S, las cuales, posteriormente, levantan la presión del fluido para que llegue al intercambiador de precalentamiento C-702 y posteriormente a los reactores.

La función del sistema analizado corresponde a: Transferir gasoil desde el acumulador F-701 hasta el intercambiador de precalentamiento C-702, a no menos de 2400 [m³/d].

2.1.2 Características de las bombas J-700 y J-700S

Las bombas centrífugas multietapas que se identifican por el TAG J-700 y J-700S son dos bombas iguales. Actúan en uno de los sistemas pertenecientes a la unidad de Hidrocracking de refinería.

Las especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1

Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga J-700.

Etapas	10
Fluido de trabajo	Gasoil
Velocidad	4886 [rpm]
Capacidad normal	1685 [m ³ /d]
Diferential Head	2029 [m]

Nota. Elaboración propia

En la Figura 23 se muestra la J-700SPARE, una de las bombas que está presente en el taller de mantenimiento y que debe estar reparada una vez que la J-700 o J-700S falle. Las tres bombas son exactamente iguales.

En Anexos 1 se muestra a detalle mediante planos la estructura del sistema de la bomba.



Figura 23. Imagen de J-700SPARE en el taller de mantenimiento.

Esta bomba es multietapa con impulsores en serie, entonces en cada etapa se agrega presión al fluido hasta llegar a la presión de descarga que lleva por diseño la bomba, saliendo por la boquilla de descarga de la caja.

Como ambas bombas son iguales, estas presentan los mismos componentes principales, los cuales se detallan en los manuales de instalación, operación y mantenimiento.

- Difusor: Componente fijo después del impulsor que tiene como función aumentar la presión del fluido.
- Anillos desgastables y casquillos: Protegen el impulsor y voluta de la bomba.
- Impulsores: Componente giratorio que transfiere energía al fluido mediante su movimiento rotacional.
- Cojinete: Soporta cargas del eje facilitando su movimiento.
- Sellos: Evita que se produzca fugas alrededor del eje.
- Sistema de aceite lubricante: Grupo de componentes para suministrar y distribuir aceite a partes móviles de la bomba.

Las condiciones para las cuales el fabricante recomienda estar alerta corresponden a:

- Caída de capacidad, caída de la presión de descarga relativa a la presión de succión, o aumento del consumo de energía de una bomba operacional.
- Vibración y operación ruidosa poco usual.
- Cambio de presión en la línea del manguito de reducción de presión.
- Caída de presión de aceite lubricante corriente abajo del filtro.
- Aumento de la temperatura del aceite lubricante en la descarga del enfriador de aceite lubricante, descarga del cojinete radial, o descarga del cojinete del empuje.
- Aumento de presión diferencial en el filtro de aceite lubricante.
- Aumento de fugas en el sello.
- Aflojamiento de los pernos de cimiento en las placas de base, placas de asiento, o pernos de sujeción.

Las recomendaciones de mantenimiento son:

- Reemplazo periódico del sello: ajustarse al reemplazo de piezas de este cuando el total de horas de operación sea la misma cantidad de horas que recomienda el fabricante.
- Material y espesor de las empaquetaduras de las carcasas: Selección correcta de empaquetaduras en caso de que estas no estén diseñadas para sellador.
- Cambio de aceite lubricante:
 - Cuando el color del aceite se ponga oscuro, indicando una contaminación con polvo y sustancias extrañas.
 - El aceite lubricante tiene apariencia lechosa o emulsificada.
 - Hay partículas extrañas en el aceite lubricante.
- Lavado ácido o caustico: para limpiar una bomba con este tipo de lavado, retirar el conjunto interior de la caja y cerrar las cavidades del sello con placas ciegas, las cuales pueden ser suministradas por la fábrica.

El manual de instalación, operación y mantenimiento entrega un listado de problemas y causas probables de estos para los cuales se recomiendan medidas correctivas (Anexos 2)

2.1.3 Contexto de evolución del sistema de bombeo de gasoil y sus exigencias

Previo al año 2007, el sistema de bombeo de gasoil opera bajo la condición de caudal de mínimo 1430 [m³/d], lo cual es cubierto de manera adecuada mediante el funcionamiento de una sola bomba. En este escenario, el diseño contempla el funcionamiento titular de la bomba J-700, mientras que la bomba J-700S está en condición de Stand-by, permaneciendo fuera de servicio y entrando en operación cuando falla la bomba principal. Este esquema asegura la continuidad operacional y disponibilidad de caudal requerido en aquel contexto operacional.

Sin embargo, a partir del año 2007, la refinería experimenta un incremento en las exigencias operacionales producto de un proceso de revamping, es decir, una actualización de la instalación destinada a aumentar la capacidad de producción utilizando los mismos equipos existentes. La nueva exigencia implica que el caudal mínimo requerido es de 2400 [m³/d], lo cual se mantiene hasta el día de hoy.

Ante esta nueva demanda, la estrategia operativa pasa de un esquema donde una bomba cubre el total de caudal mientras la otra permanecía en reserva, a una configuración donde ambas bombas deben operar simultáneamente.

2.2 Representación de la configuración lógica del sistema de bombeo de gasoil mediante Diagrama de Bloques de Confiabilidad

Al presentar los límites del sistema que es objeto de estudio en este trabajo, se describe la función como: Transferir gasoil desde el acumulador F-701 hasta el intercambiador de precalentamiento C-702, a no menos de 2400 [m³/d].

Debido a que el caudal de las bombas que conforman el sistema analizado tiene la capacidad máxima de 1685 [m³/d], la función puede cumplirse mediante la operación

simultánea de ambas bombas, de manera que contribuyan conjuntamente al flujo total sumando caudales que permitan alcanzar el mínimo de 2400 [m³/d].

Por lo tanto, el incumplimiento de la función es: No ser capaz de transportar gasoil desde el acumulador F-701 hasta el intercambiador de precalentamiento si el caudal total entregado por el sistema es inferior a 2400 [m³/día], ya sea por la falla de una de las bombas o por una reducción en el desempeño de cualquiera de ellas que impida alcanzar dicho valor mínimo.

Desde el punto de vista de la teoría de la confiabilidad, la dependencia de que ambas bombas centrífugas (J-700 y J-700S) se deben encontrar operativas y entregando conjuntamente el caudal mínimo requerido para cumplir la función del sistema, hace que estos equipos correspondan a una configuración en serie con respecto a los Diagramas de Bloques de Confiabilidad. La representación del sistema analizado mediante esta última herramienta se muestra en la Figura 24:



Figura 24: Representación del sistema analizado en Diagrama de Bloques de Confiabilidad.

Elaboración propia.

En base a la función que tiene que cumplir el sistema de bombeo actual y su representación mediante Diagrama de Bloques de confiabilidad, se presentan dos tipos de incumplimientos de función.

- Bajada de carga: Cuando el sistema aún entrega caudal, pero por debajo del mínimo requerido debido a que solo un bloque (J-700 o J-700S) cumple su función. Este incumplimiento de función se representa en la Figura 25.



Figura 25. Representación en diagrama de bloques de detención total de sistema actual. Elaboración propia.

- Detención total: Cuando ningún bloque cumple su función y, por lo tanto, en caso de no estar ninguno operando, no existe entrega de caudal. Este se representa en la Figura 26.



Figura 26. Representación en diagrama de bloques de detención total de sistema actual. Elaboración propia.

2.3 Evaluación teórica de la confiabilidad del sistema de bombeo de gasoil ante la evolución del contexto operacional

A partir del contexto evolutivo descrito anteriormente, resulta pertinente realizar una evaluación teórica inicial que el aumento de las exigencias operativas ha tenido sobre la confiabilidad del sistema que es objeto de estudio.

La Configuración de Diagrama de bloques de Confiabilidad que tiene el sistema de bombeo de gasoil previo al año 2007 (pre-revamping) corresponde a la de Standby. Su representación se muestra en la Figura 27.

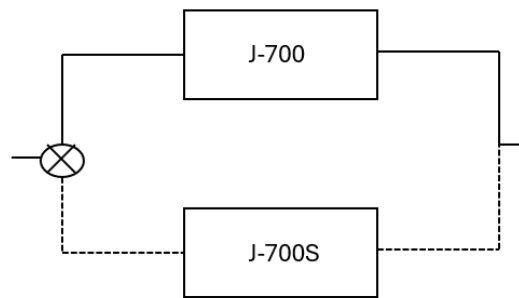


Figura 27. Representación de sistema de bombeo de gasoil pre-revamping en Diagrama de Bloques de Confiabilidad. Elaboración propia.

El sistema actual (post-revamping) corresponde al sistema de bombeo de gasoil que es objeto de estudio en este trabajo, el cual es mostrado en la Figura 27.

Dado que no se dispone de un historial de vida previo al año 2007 de los equipos involucrados, el análisis se sustenta en datos de referencia provenientes del OREDA. Se selecciona el promedio de tasa de falla de 141,62 por 10^6 horas en el contexto de operational time (que considera tiempo de funcionamiento), como se muestra en la Figura 28.

Taxonomy no 1.3.1.9		Item Machinery Pumps Centrifugal Gas processing									
Population 26	Installations 3	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands 155				
		Calendar time * 0.7360			Operational time † 0.6181						
Failure mode		No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)				Active rep.hrs	Repair (manhours)			
			Lower	Mean	Upper	SD		n/τ	Min	Mean	Max
All modes		81*	0.06	127.76	549.81	212.98	110.06	7.3	1.0	16.0	179.0
		81†	0.04	141.62	622.44	243.83	131.04				

Figura 28. Tasa de falla de OREDA para bombas. Fuente: OREDA participants (2002).

En este análisis, se considera solo las bombas como componentes del bloque J-700 y J-700S en las Figuras 24 y 27, ya que es un acercamiento teórico simplificado sobre cómo afecta la configuración del diseño en la confiabilidad. Posteriormente, para los sistemas analizados en este estudio, los bloques abarcan más componentes dentro de ellos una vez representados con los sistemas con Diagrama de Bloques de confiabilidad.

Para el cálculo, se considera que ambas bombas tienen la misma tasa de falla en ambos escenarios (pre y post revamping). Además, en esta primera instancia de análisis se realiza una comparación teórica asumiendo que ambos escenarios cumplen con la misma función, con el propósito de aislar y visualizar el efecto que los cambios en la configuración del diseño tienen sobre la confiabilidad del sistema.

Utilizando las fórmulas (2), (5) y (12), teniendo en cuenta que ambas bombas, en ambos escenarios, tienen la misma tasa de falla, se obtiene las curvas de la Figura 29.

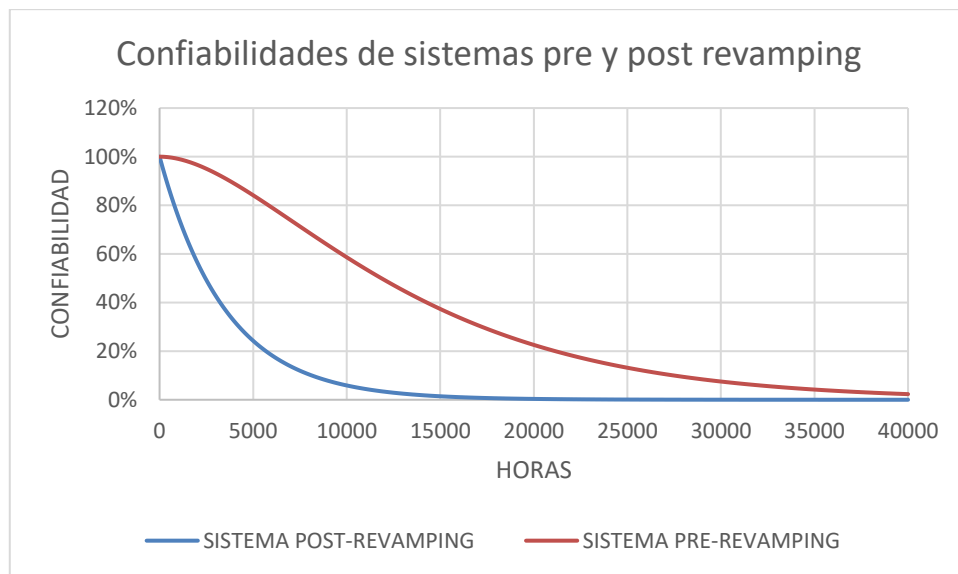


Figura 29. Gráfico comparativo entre confiabilidad de sistemas de bombeo de gasoil antes y después del revamping. Elaboración propia.

Con lo que muestra la Figura 29, se analiza que, considerando el intervalo de operación de 0 a 40,000 horas, el sistema en Stand-by (pre revamping), en términos de confiabilidad, siempre tiene una probabilidad mayor de que se cumpla la función requerida a lo largo de todo el rango temporal evaluado.

Del análisis anterior, se concluye que, desde el punto del indicador de Confiabilidad, el cambio de configuración implica una disminución del potencial de confiabilidad que se puede alcanzar.

2.4 Recolección y evaluación de información del historial de vida del sistema de bombeo de gasoil

En esta sección, se desarrolla el proceso de recolección y evaluación de la calidad de los datos asociada al historial de vida del sistema actual de bombeo de gasoil, con el propósito de establecer una base técnica que permita caracterizar el desempeño de los parámetros RAM.

Primero, se presentan los datos que recomienda la norma ISO 14224:2016, la cual establece las categorías de información necesarias para los estudios de confiabilidad (SDA), LCC y RCM. El objetivo es conocer el estándar que debe tener la información recopilada.

Después, se describen las fuentes de información que se utilizan para recopilar datos sobre el historial de vida del sistema que es objeto de estudio.

Finalmente, se realiza una evaluación de la calidad de los datos recopilados, verificando el grado de cumplimiento respecto de los parámetros definidos por la norma ISO 14224:2016. El objetivo es determinar y cuantificar el nivel de calidad y establecer el marco de incertidumbre bajo el cual deberán interpretarse los resultados posteriores de las simulaciones posteriores.

2.4.1 Datos del historial de vida que recomienda registrar la ISO 14224:2016.

La norma recomienda 23 datos para los estudios de confiabilidad (SDA), costo de ciclo de vida (LCC) y mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Clasificándolos en tres categorías: Equipos a registrar, datos de falla a registrar y datos de mantenimiento a registrar. La Tabla 2 muestra los parámetros recomendados, donde en su columna de comentarios describe a qué corresponde.

Tabla 2.

Datos de equipos, fallas y mantenimiento a registrar que recomienda la ISO 14224:2016.

SDA + LCC +RCM		Comentarios
Equipo a registrar	Ubicación del equipo	Tag del equipo
	Clasificación	Clase y tipo de equipo y sistema.
	Datos de instalación	Atributos de ubicación y uso.
	Datos del fabricante	Nombre del fabricante y modelo designado
	Características del diseño	Potencia, velocidad, presión, redundancia, entre otras.
	Periodo de vigilancia	Tiempo total que incluye los Up time y Down Time.
	Periodo de operación acumulado	Tiempo acumulado cumpliendo.
	Número de demandas	Número de activaciones funcionales.
	Modo de operación	Modo en que cumple la función.
Datos de falla a registrar	Equipo	Equipos específicos dentro de una clase de equipos definida por sus límites.
	Subunidad	Montaje de ítems que proporciona una función específica requerida por el equipo dentro del límite principal para lograr un desempeño esperado.
	Ítem mantenible	Ítem que constituye una parte o un ensamble de partes que normalmente están en el nivel más bajo en la jerarquía de equipos durante mantenimiento.
	Modo de falla	Forma en la que ocurre una falla.
	Impacto de falla en la operación	Efecto de una falla en la función de un equipo en la planta.
	Mecanismo de falla	Proceso que conduce a una falla
	Causa de falla	Serie de circunstancias que conducen a la falla
Datos de mantenimiento a registrar	Categoría de mantenimiento	Tipos de mantenimiento.
	Actividad de mantenimiento	Lo realizado en mantenimiento.
	Tiempo de parada	Conocido como Down Time.
	Tiempo de mantenimiento activo	Tiempo efectivo para lograr reparar un ítem.
	HH mantenimiento por disciplina	Horas hombre de mantenimiento por disciplina (mecánico, eléctricos, instrumentos, etc)
	HH de mantenimiento total	Total de horas hombre de mantenimiento

Nota. Adaptada de ISO (2016)

2.4.2 Fuentes de información disponibles sobre el historial de vida del sistema de bombeo de gasoil y periodo de estudio

Dado que la empresa no dispone de una base de datos que reúna la totalidad de los datos recomendados por la norma ISO 14224:2016, se realiza una base de datos propia. Para ello, se hizo un levantamiento de todas las fuentes posibles de información que dispone la empresa.

A partir de las siguientes fuentes se obtuvo información sobre los registros de falla, actividades de mantenimiento y datos de los equipos involucrados en el sistema de bombeo que es objeto de estudio:

- PI: Software que monitorea los parámetros importantes de los equipos durante las veinticuatro horas del día. En este caso, se pudo obtener las potencias de los motores de las bombas J-700 y J-700S por cada hora transcurrida en el intervalo de fechas de estudio.
- SAP: Software que permite mantener registros de mantenimientos e intervenciones a equipos en órdenes de trabajo (OT). Estas detallan, entre otros datos, la fecha máxima de realización y las horas hombre que se predicen para el trabajo.
- Bitácora del jefe de turno: Para cada unidad de la planta existe una bitácora que la realiza el jefe de turno, donde este es encargado de registrar cualquier evento o intervención importante ocurrido en el lugar. La información que contiene es fecha, hora y descripción de lo que sucedió en la unidad.
- Eventos RBB: Registro de las detenciones de las unidades de la planta. Se detallan la fechas y horas de inicio y término de estas, además de una descripción registrando las causas de estas detenciones.
- Manual del fabricante: Documento elaborado por el fabricante del equipo que contiene especificaciones técnicas del equipo, instrucciones de la instalación, puesta en marcha y recomendación sobre la operación y mantenimiento.

El periodo de estudio, es decir, el intervalo de fechas a los cuales pertenece la información recopilada corresponde desde el 01/01/2020 a las 00:00 hasta el 31/01/2025 a las 10:00.

2.4.3 Evaluación de la calidad de los datos

Con la base de datos elaborada a partir de la recopilación de la mayor cantidad de datos posible, se procede a evaluar su calidad verificando si los datos requeridos por la norma ISO 14224:2016 se encuentran efectivamente registrados. El objetivo de esta sección corresponde a verificar el grado de cumplimiento de los registros en el historial de vida, para conocer la solidez de los datos recopilados y el nivel de incertidumbre asociado a ellos.

Para esta evaluación, se considera únicamente, durante el periodo de estudio definido, los eventos de detención del sistema de bombeo de gasoil (37 registros en total) cuya causa se asocia a los sublímites de los equipos involucrados, es decir, la bomba centrífuga, motor y sistema de lubricación de los subsistemas J-700 y J-700S. La selección de estos eventos responde a que el estudio de este trabajo se centra en el comportamiento interno del sistema y de los equipos que lo involucran.

El nivel de cumplimiento se determina verificando, para cada dato que recomienda la norma ISO 14224:2016 (Tabla 2), si está efectivamente registrado en cada uno de los eventos de detención. Es decir, para cada parámetro evaluado que recomienda la norma se revisa individualmente cada registro de detención para confirmar la presencia o ausencia de la información correspondiente. Posteriormente, para cada dato se cuantifica cuántos registros de detención lo contienen y se compara esa cantidad con el total de registros de detención analizados. El resultado se expresa como un porcentaje que representa la proporción de registros que cumplen con el criterio establecido para cada uno de los datos que recomienda la norma.

Con esto, el nivel de cumplimiento sirve como indicador de calidad y consistencia de datos disponibles y el porcentaje restante (de incumplimiento) puede interpretarse como una medida o grado de incertidumbre. Es importante considerar que, si bien los

modelos de simulación permiten generar predicciones sobre los parámetros RAM del sistema analizado, la precisión de estas estimaciones está condicionada por la calidad de la información disponible. Por lo tanto, los resultados que se obtienen de las simulaciones posteriores deben interpretarse considerando la presencia de la incertidumbre de los datos, la cual limita la exactitud de las predicciones y afecta la validez de las conclusiones realizada.

La Figura 30 muestra el porcentaje de cumplimiento de los 17 registros del subsistema J-700 para cada uno de los datos que recomienda la norma ISO 14224:2016.

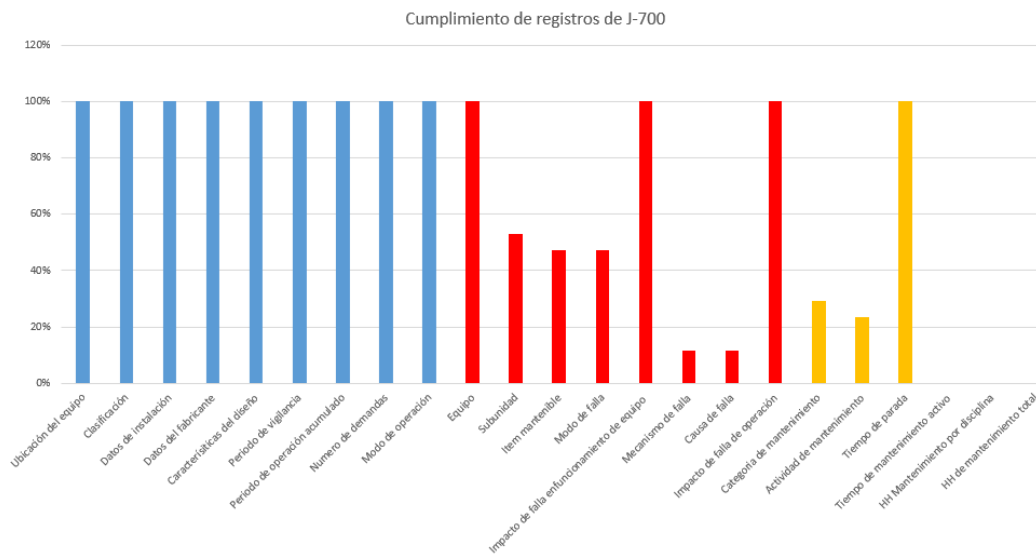


Figura 30. Gráfico de proporción de cumplimiento de registros de J-700. Elaboración propia.

De los resultados de la Figura 30, destacan los siguientes porcentajes:

- Para la categoría de datos de equipo (color azul en Figura 30), los 17 registros tienen todos los datos que se recomiendan.
- En la categoría de datos de falla (color rojo en Figura 30), si bien se tiene registrado siempre equipo afectado, solo el 53% de los registros contiene la subunidad asociada y el 47% su ítem mantenible. Solo el 47% del total de los registros contiene su modo de falla y, tanto para el mecanismo de falla como para la causa de falla, solo el 12% del total de registros tienen estos datos.

- Dentro de la categoría de datos de mantenimiento (color naranja en Figura 30), solo el 29% de los registros totales tiene asociado una categoría de mantenimiento. El 24% tiene el dato de qué actividad de mantenimiento se realizó. Ningún registro presenta un tiempo de mantenimiento activo específico, ni tampoco de horas hombres asociado al mantenimiento.
- En el subsistema J-700, contabilizando la cantidad total de datos que debería haber por la cantidad total de registros de detenciones en este subsistema, la categoría con mayor cumplimiento de datos corresponde a la de Equipo a registrar con un 100% de cumplimiento de registro de datos, luego le sigue la categoría Datos de falla a registrar con un 59% de cumplimiento, mientras que la categoría Datos de mantenimiento a registrar con un 25% de cumplimiento.

La Figura 31 muestra el porcentaje de cumplimiento de los 20 registros del subsistema J-700S para cada uno de los datos que recomienda la norma ISO 14224:2016.

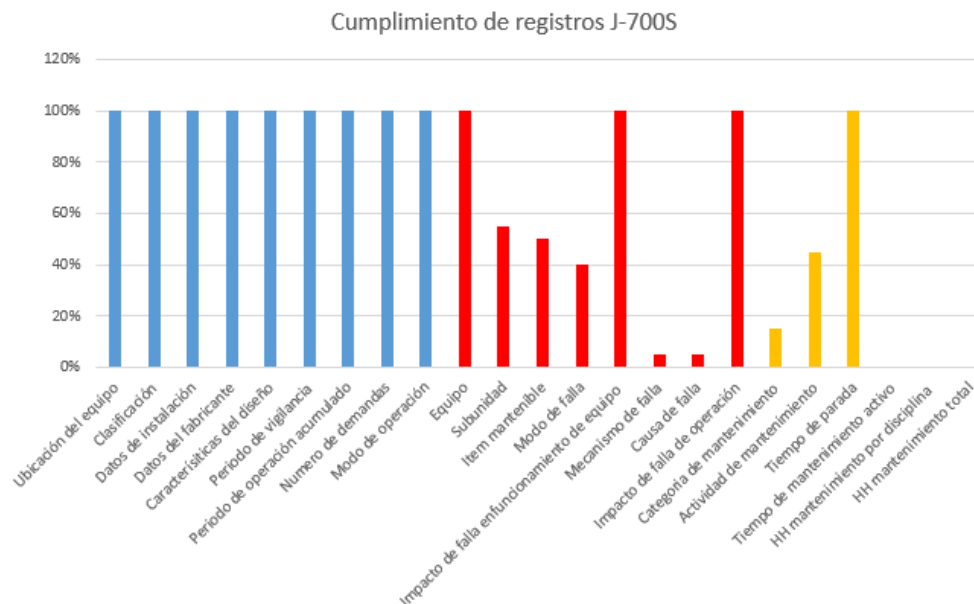


Figura 31. Proporción de cumplimiento de registros de J-700S. Elaboración propia.

De los resultados de la Figura 31, destacan los siguientes porcentajes:

- Para la categoría de datos de equipo (color azul en Figura 31), los 20 registros tienen todos los datos que se recomiendan.

- En la categoría de datos de falla (color rojo en Figura 31), si bien se tiene registrado el equipo afectado, solo el 55% de los registros contiene la subunidad asociada y el 40% su ítem mantenible. Además, el 40% del total de los registros contiene su modo de falla y, tanto para el mecanismo de falla como para la causa de falla, el 5% del total de registros tienen estos datos.
- Dentro de la categoría de datos de mantenimiento (color naranja en Figura 31), solo el 15% de los registros totales tiene asociado una categoría de mantenimiento. El 45% tiene el dato de qué actividad de mantenimiento se realizó. Ningún registro presenta un tiempo de mantenimiento activo específico, ni tampoco de horas hombres asociado al mantenimiento.
- En el subsistema J-700S, contabilizando la cantidad total de datos que debería haber por la cantidad total de registro de detenciones en este subsistema, la categoría con mayor cumplimiento de datos corresponde a la de Equipo a registrar con un 100% de cumplimiento de registro de los datos, luego le sigue la categoría Datos de falla a registrar con un 57% de cumplimiento, mientras que la categoría Datos de mantenimiento a registrar con un 27% de cumplimiento.

Las causas del grado de incumplimiento o incertidumbre de los registros en ambos subsistemas se explican principalmente por la falta de información detallada sobre los eventos de detención y actividades de mantenimiento.

Por una parte, existen registros de detención de los cuales se confirma qué equipo dejó de operar, pero no se dispone de ningún dato que indique la causa específica de la detención ni la naturaleza de la falla que la generó. Para el subsistema J-700 se identifican 4 registros de estas características, mientras que para el subsistema J-700S se tienen 7 registros de ese tipo.

Además, el dato correspondiente a Categoría de mantenimiento que se encuentra documentada de manera consistente corresponde únicamente al mantenimiento preventivo planificado, que en la mayoría de los casos coincide con paros programados

de planta. Sin embargo, no se dispone de información sobre las horas de mantenimiento activo ejecutadas, ni de las horas hombre que estos trabajos implicaron.

Las fuentes de información disponibles para el análisis resultaron útiles para caracterizar los eventos de detención. Sin embargo, su precisión y cantidad de datos disponibles presentan limitaciones, tal como reflejan los porcentajes de cumplimiento de los registros. Aunque la combinación de múltiples fuentes permite enriquecer la base de datos, la solidez de esta depende fundamental de que los datos sean registrados de manera completa y consistente. Esto sugiere la necesidad de establecer procedimientos sistemáticos de captura y registro de información, asegurando que cada evento y cada parámetro relevante del sistema analizado queden documentados de forma adecuada.

2.5 Evaluación de parámetros RAM para el sistema de bombeo de gasoil actual

En esta sección se desarrolla la simulación de los parámetros RAM correspondientes al sistema de bombeo de gasoil actual. El propósito de este análisis es caracterizar el desempeño del sistema con su configuración vigente, estableciendo la base que permita, posteriormente, comparar su comportamiento con las alternativas de configuración propuestas. Con esto, se busca determinar qué ocurriría en el horizonte de evaluación si el sistema continúa funcionando sin modificaciones, para contar con un punto de referencia cuantitativo para la toma de decisiones.

En primer lugar, se presentan las suposiciones y consideraciones adoptadas para la evaluación del comportamiento histórico del sistema analizado en base al historial de vida con los datos recopilados y para el proceso de simulación. Además, se incorporan los criterios metodológicos que guían tanto el uso de las herramientas de simulación (softwares) como la obtención de resultados, incluyendo la aplicación de fórmulas y procedimientos complementarios cuando corresponde. Establecer suposiciones y consideraciones influye directamente en los valores obtenidos y en la forma en que

estos deben ser interpretados. Cualquier conclusión derivada del análisis se formula en coherencia con las condiciones bajo las cuales se construyó la representación del sistema.

Finalmente se presentan los resultados sobre el historial de vida recopilado y de la simulación para el sistema de bombeo de gasoil actual. Esto constituye un punto de referencia para comparar cuantitativamente los parámetros con las configuraciones alternativas que son propuestas posteriormente. Es importante destacar que los resultados sobre el historial de vida y las simulaciones son en base a suposiciones y consideraciones fundamentadas previamente.

2.5.1 Consideraciones, suposiciones y criterios para la simulación del sistema de bombeo de gasoil actual

A continuación, se presenta las consideraciones, suposiciones y criterios definidas para la simulación del comportamiento del sistema de bombeo de gasoil actual.

- Consideraciones operativas para la simulación.
 - 1) Horizonte temporal de simulación: Se establece un periodo de simulación de cuatro años (35040 horas), correspondiente al intervalo típico entre paros de planta programados en la instalación analizada. Esto permite representar un ciclo operativo bajo condiciones de funcionamiento continuo.
 - 2) Número de iteraciones: Se realizan 10000 iteraciones durante la simulación. Esta cantidad de repeticiones tiene como propósito aumentar la robustez estadística de los resultados, reduciendo la variabilidad de las estimaciones de los parámetros RAM, haciéndolas más estables.
- Suposiciones relacionadas con la calidad de los datos.
 - 1) Clasificación del tipo de mantenimiento: Dado el nivel de incumplimiento de registros asociados a las categorías de mantenimiento, se asume que todos los eventos de detención que no corresponden a paros programados de planta se consideran mantenimiento correctivo. Esta suposición se fundamenta en la práctica operativa de la planta, la cual opera bajo un

régimen continuo (24/7) de alta exigencia, y donde la planificación de mantenimiento preventivo se concentra casi exclusivamente en los periodos de paro de la planta. La validez de este supuesto es respaldada por el equipo de planificación y por el personal técnico encargado del mantenimiento.

- 2) Duración de los tiempos de reparación: Debido al nivel de incumplimiento del registro de datos correspondiente a las horas de mantenimiento activo y la mano de obra asociada, se considera que la duración total de cada evento de detención corresponde directamente al tiempo activo de reparación del componente afectado. Este criterio se adopta debido a que no existe una proporción documentada entre los tiempos administrativos, logísticos y efectivos de intervención. El personal técnico, desde su experiencia, indica que, en la mayoría de los casos, el tiempo registrado refleja predominantemente el tiempo real de intervención sobre el sistema.
 - 3) Asignación de modo de falla en los registros incompletos: Para los registros de los cuales se tiene conocimiento de la detención, pero sin datos sobre la causa o naturaleza de la falla, se asume que estas corresponden a fallas asociadas a fugas en el sello mecánico en las bombas centrífugas. Esto se fundamenta con la experiencia del personal técnico de mantenimiento, quienes señalan que, cuando se trata de detenciones por causas propias sistema de bombeo de gasoil actual, dicho modo de falla representa la mayor proporción de estos eventos.
- Criterios metodológicos para la estimación de parámetros y configuración del modelo de simulación para J-700 y J-700S.
 - 1) Clasificación de los registros del historial operacional: Se realiza con el software Reliasoft, donde cada evento se designa al modo de falla correspondiente. Es decir, mediante la censura de datos hacia la derecha, se hace la distinción cuando los eventos de detención corresponden a cada modo de falla que este es de interés en el momento de analizarlo.
 - 2) Estimación de parámetros y selección de distribuciones de probabilidad para cada modo de falla: La estimación de los parámetros de las

distribuciones de probabilidad falla se realiza mediante el módulo Distribution Wizard del software Reliasoft, el cual permite determinar las distribuciones que mejor representan el comportamiento de los datos mediante pruebas estadísticas. Se seleccionan los parámetros y distribuciones de probabilidad de falla que entregue el módulo Distribution Wizard (Anexos 3).

- 3) Estimación de distribución probabilística para tiempos de reparación para cada modo de falla: La modelación de los tiempos de reparación se realiza adoptando la distribución de probabilidad Log normal, en línea con la recomendación del autor Arata, quien destaca su uso frecuente para representar procesos de reparación debido a su capacidad para reflejar tanto variaciones habituales como variaciones accidentales del tiempo de intervención (Arata, 2009).

Mediante el uso de Reliasoft, seleccionando la distribución Log normal y el conjunto de tiempos de reparación, se obtienen los parámetros característicos de esta distribución probabilística.

- 4) Representación del sistema en el modelo de simulación: Se desarrolla mediante el módulo Avsim de Availability Workbench, donde el sistema se modela mediante un Diagrama de Bloques de Confiabilidad (Figura 32).



Figura 32. Modelamiento de sistema de bombeo actual en software. Elaboración propia

Inicialmente, los bloques J-700 y J-700S se modelan como un sistema principal con configuración en serie (Figura 32). Posteriormente, y debido a que el software utilizado permite asignar únicamente un modo de falla por bloque, cada uno de estos (J-700 y J-700S) se descompone en un nivel inferior de modelación. En este nivel, los bloques J-700 y J-700S contienen

un subsistema en serie, donde cada bloque corresponde a un modo de falla específico (Figura 33 y 34).



Figura 33. Modelamiento en software de modos de falla J-700. Elaboración propia



Figura 34. Modelación en software de modos de falla J-700S. Elaboración propia

La modelación de estos subsistemas en serie de bloques de modos de falla se fundamenta en que la ocurrencia de cualquiera de los modos de falla implica la pérdida de la función del bloque principal correspondiente (J-700 y J-700S) y, en consecuencia, la falla del sistema principal. Por lo tanto, dentro de la simulación, se considera que los bloques principales pierden su función cuando se presenta al menos un modo de falla asociado a dicho bloque.

A cada bloque asociado a un modo de falla se le asignan las distribuciones probabilísticas correspondientes, junto con los parámetros asociados a cada modo de falla y los tiempos de reparación, definidos por la herramienta Distribution Wizard.

- 5) Parámetros estimados mediante la simulación: Los parámetros asociados al sistema METBF, MTTR, Confiabilidad (R), Disponibilidad (A) y tasa de falla se estiman mediante las simulaciones ejecutadas en el módulo Avsim del software Availability Workbench, utilizando los parámetros y distribuciones probabilísticas seleccionadas, junto con la configuración del Diagrama bloques de confiabilidad determinada.

- 6) Estimación de mantenibilidad general del sistema: Se realiza mediante la aproximación de la fórmula (4) aplicando el MTTR del sistema, el cual es estimado por el software Availability Workbench.

2.5.2 Resultados en base al historial de vida y simulación de sistema de bombeo de gasoil actual

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la información recopilada del historial de vida del sistema de bombeo de gasoil actual abarcando las fechas del periodo de estudio que se definen anteriormente (aproximadamente de cinco años), junto con los resultados de la simulación del desempeño de parámetros RAM de este mismo sistema. Es fundamental destacar que, en aquellos casos donde la información disponible presentaba incumplimiento de datos, es necesario aplicar las suposiciones y consideraciones que se detallan previamente. Por lo tanto, los resultados presentados, tanto los derivados del análisis histórico como los obtenidos mediante simulación, deben ser interpretados teniendo en cuenta estas suposiciones y consideraciones, lo que implica que las conclusiones que se entregan representan una aproximación fundamentada al comportamiento real del sistema, y no valores absolutos.

El propósito de esta sección es entregar los resultados de la caracterización del desempeño del sistema desde dos perspectivas: El comportamiento observado históricamente y el comportamiento esperado a futuro según el modelo de simulación.

En primer lugar, se analizan los datos provenientes del historial de vida. El tiempo total de detención se divide en tres tipos de detenciones:

- Tiempo de detenciones por causas externas al sistema de bombeo de gasoil actual.
- Tiempo de detenciones por motivos de mantenimiento correctivo asociadas a fallas propias del sistema de bombeo de gasoil actual.

- Tiempo de detenciones programadas correspondientes a actividades de mantenimiento planificado asociado al sistema de bombeo de gasoil actual.

Esta caracterización permite comprender el impacto relativo de cada categoría sobre el sistema analizado.

Adicionalmente, se realiza un análisis de criticidad de los modos de falla mediante la aplicación del gráfico Jack-Knife, con el propósito de identificar qué modo de falla presenta mayor impacto en la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema. Esto define la priorización de esfuerzos en las acciones de mantenimiento.

Posteriormente, se presentan los resultados de la simulación del sistema actual de bombeo de gasoil. Esto permite proyectar el comportamiento del sistema en un horizonte temporal de cuatro años, estimando los indicadores RAM. Los resultados de la simulación permiten evaluar el comportamiento esperado del sistema analizado, constituyendo una base para comparación con las configuraciones alternativas propuestas en etapas posteriores.

2.5.2.1 Resultados en base al historial de vida del sistema de bombeo de gasoil actual

Para la presentación de los resultados obtenidos a partir del historial de vida recopilado durante el periodo de estudio, el análisis se organiza considerando de manera independiente los subsistemas que conforman el sistema de bombeo de gasoil actual, específicamente el subsistema J-700 y el subsistema J-700S. De esta manera, se permite identificar con mayor precisión el comportamiento del sistema analizado.

Para cada uno de los subsistemas, se elabora un gráfico de distribución del tiempo de detención, distinguiendo entre las detenciones por causas externas, correctivas y programadas. Adicionalmente, para cada subsistema se construye un gráfico Jack-Knife, con el propósito de identificar el modo de falla más crítico.

No obstante, es necesario destacar que el proceso de recopilación de información presentó ciertos grados de incumplimiento en datos y registros incompletos, por lo cual se impusieron suposiciones fundamentadas que se describen previamente para

complementar los datos. Estas suposiciones inciden en los resultados obtenidos, por lo que su interpretación debe considerar este contexto.

La Figura 35 muestra las proporciones de tiempo total de detención (12911 horas) del subsistema J-700 según el tiempo de cada tipo de evento.

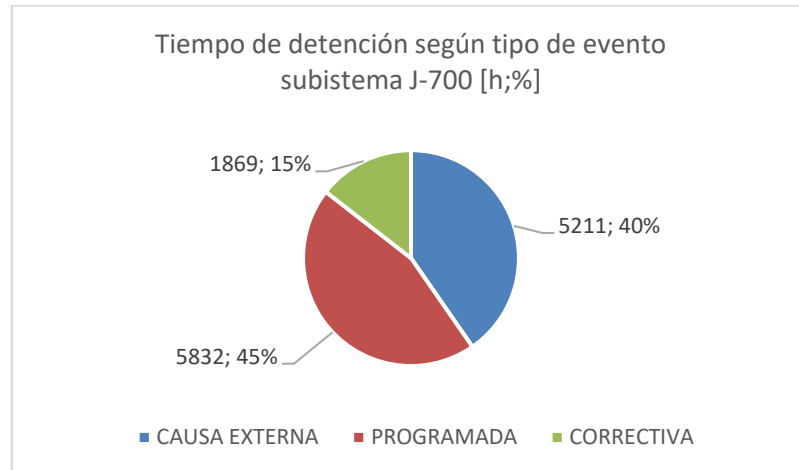


Figura 35. Gráfico de proporción del tiempo de detención según tipo de evento de subsistema J-700.

Elaboración propia.

La Figura 35 muestra que el tiempo de detenciones programadas (5832 horas) corresponden al 45% del tiempo total de detención que tuvo el subsistema J-700 durante el periodo de estudio, siendo el tipo de detención con mayor proporción de tiempo. La minoría del tiempo total de detención corresponde al tiempo de detenciones correctivas (1869 horas), correspondiendo a un 15% del total.

Se presenta el gráfico Jack-knife del subsistema J-700 en la Figura 36.

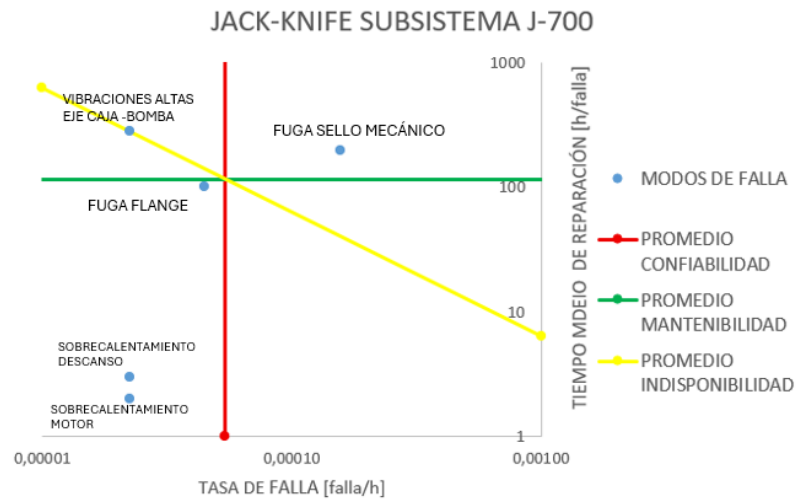


Figura 36. Gráfico Jack-knife de subsistema J-700. Elaboración propia.

Como muestra la Figura 36, de los cinco modos de fallas que ocurren en el subsistema J-700 destaca la fuga por sello mecánico, la cual se ubica en el cuadrante del Agudo-Crónico. Por lo tanto, al momento de priorizar los modos de falla al querer atacarlos, este debería cobrar mayor importancia

La Figura 37 muestra las proporciones de tiempo total de detención (20192 horas) del subsistema J-700S según el tipo de evento.

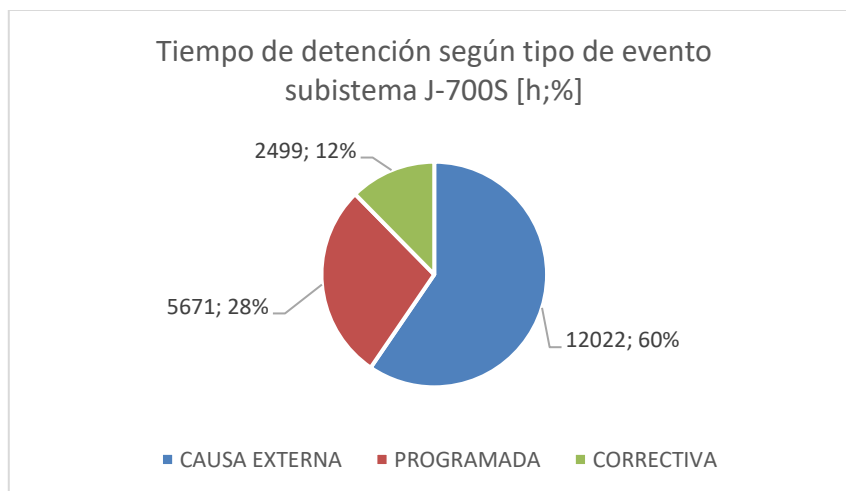


Figura 37. Gráfico de proporción del tiempo de detención según tipo de evento de subsistema J-700S. Elaboración propia.

La Figura 37 muestra que la mayoría del tiempo de detención total del subsistema J-700S corresponde al tiempo de detenciones por causas externas (12022 horas) con 60% del tiempo total de las detenciones. Al igual que para la J-700, la proporción minoritaria del tiempo total detenido corresponde al tiempo de las detenciones correctivas (2499 horas). En este caso, esa proporción corresponde al 12% del tiempo total de detención.

La Figura 38 muestra el diagrama Jack-knife del subsistema J-700S.

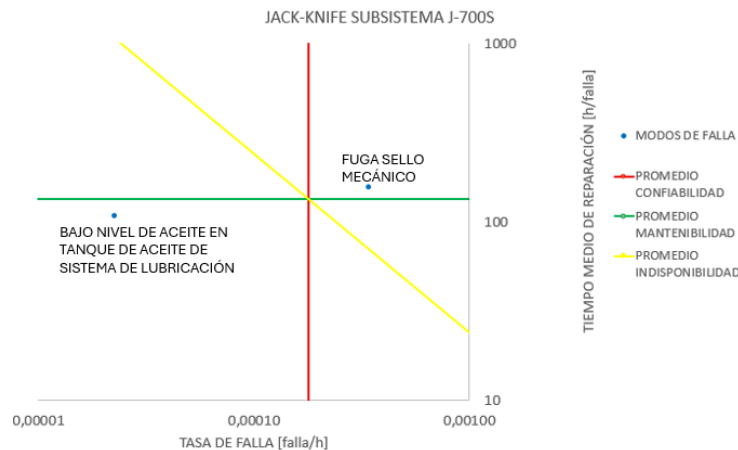


Figura 38. Gráfico Jack-knife de subsistema J-700S. Elaboración propia.

La Figura 38 muestra que en el subsistema J-700S actúan dos modos de falla, destacando nuevamente la fuga de sello mecánico en el cuadrante de Agudo-Crónico, generando una indisponibilidad mayor que el promedio.

A continuación, se presenta una síntesis de los principales resultados obtenidos a partir del análisis del historial de vida de los subsistemas J-700 y J-700S, considerando que dichos resultados están sujetos a suposiciones implementadas debido a incumplimiento en los datos de registros de detención. Por lo tanto, las conclusiones expuestas representan una aproximación al comportamiento real de los subsistemas analizados y deben interpretarse con precaución.

- El tiempo de detención correspondiente a las detenciones por mantenimiento correctivo presentan la menor proporción del tiempo de detención total en ambos subsistemas. Esto sugiere que los subsistemas analizados no están siendo dominados por fallas inesperadas.

- En ambos subsistemas, el modo de falla asociado a la fuga en el sello mecánico se manifiesta como “agudo-crónico”. Por esto, la recomendación es priorizar el modo de falla en las estrategias de mantenimiento en estos subsistemas.

2.5.2.2 Resultados de la simulación del sistema de bombeo de gasoil actual

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema de bombeo de gasoil en su configuración actual, es decir, en serie. La modelación de bloques y sus modos de falla, junto con su simulación, se hacen mediante suposiciones y consideraciones que se detallan previamente, las cuales condicionan los resultados. En consecuencia, estos deben ser interpretados como estimaciones orientativas del comportamiento del sistema, reconociendo que podrían diferir de su desempeño real.

El propósito de estos resultados es presentar una base sobre la cual se comparan configuraciones alternativas en capítulos posteriores.

Los resultados que se obtienen de la simulación se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3

Parámetros obtenidos de simulación del sistema de bombeo de gasoil actual.

MTTR [h]	189,90
METBF [h]	1632,00
R (35040 [h])	0,00%
A (35040 [h])	88,36%
M (168 [h])	58,72%
Tasa Fallas/año	5,37

Nota. Elaboración propia.

Si la empresa quisiera seguir con el sistema de bombeo de gasoil actual durante los próximos 4 años, se tiene que:

- El tiempo medio de reparación para recuperar la función del sistema es de 189,9 horas.
- El tiempo medio esperado entre eventos de incumplimiento de función del sistema es de 1632,0 horas.
- La confiabilidad del sistema para un horizonte de cuatro años (35040 horas) resulta igual a 0,0%, lo que implica que la probabilidad de que el sistema opere durante todo ese periodo sin incumplimiento de su función es nula. Es más, su tasa de falla señala que, durante los cuatro años, hubo aproximadamente 5,37 oportunidades por año donde no se cumplió la función.
- La disponibilidad en los cuatro años (35040 horas) será 88,36%. Es decir, existe una probabilidad de 88,4% que, durante los cuatro años simulados, el sistema se encuentre cumpliendo su función.
- La mantenibilidad es del 58,72% para un periodo de una semana (168 horas). Es decir, existe una probabilidad del 58,72% que en el intervalo de una semana el sistema pueda recuperar su función al repararlo. Se tomó como referencia una semana debido a que, según instrucción del área de operaciones, la pérdida de función está permitida por un periodo de una semana.

A partir de los resultados obtenidos para el sistema actual, modelado bajo una configuración en serie, se identifica que el software que se ocupa para realizar la simulación no distingue los distintos tipos de incumplimiento de la función del sistema. En particular, el software no especifica dentro de los resultados qué proporción del incumplimiento de función del sistema corresponde a una bajada de carga o detención total del sistema.

3. Propuestas de rediseño del sistema

El objetivo de este capítulo es evaluar alternativas de reconfiguración del sistema de bombeo de gasoil actual, con el fin de mejorar su desempeño en términos de los parámetros RAM.

Para ello, se proponen dos configuraciones alternativas. La primera plantea la incorporación de una bomba nueva capaz de cumplir por si sola la función del sistema de bombeo de gasoil. La segunda opción propone incorporar al sistema actual una bomba que está disponible en el taller, la cual es utilizada actualmente como reemplazo ante alguna falla de las que operan en el sistema de bombeo de gasoil actual. Resulta pertinente adecuar, para los sistemas propuestos, los conceptos de bajada de carga y detención total de un sistema detallados anteriormente para la configuración en serie del sistema de bombeo actual. La incorporación de estos conceptos permite comprender de mejor manera el funcionamiento lógico de las configuraciones propuestas.

Después, y siguiendo una metodología equivalente a la aplicada para la configuración del sistema de bombeo gasoil actual, se procede a la modelación y simulación de ambas alternativas utilizando las herramientas correspondientes, incorporando las consideraciones y suposiciones que se ocupan para el sistema actual, así como nuevos supuestos para representar el comportamiento de los equipos en las configuraciones propuestas. Es importante señalar que las suposiciones y consideraciones influyen en los resultados que se obtienen, por lo que los valores presentados deben interpretarse como estimaciones del comportamiento esperado del sistema y no como valores determinísticos.

Finalmente, se presentan los resultados de las simulaciones de las configuraciones propuestas y su respectivo análisis comparativo con el desempeño del sistema en su configuración actual. Este contraste permite determinar cuál configuración presenta un mejor comportamiento con respecto a los parámetros RAM.

3.1 Descripción de las alternativas de reconfiguración propuestas

Con el propósito de mejorar el desempeño de los parámetros RAM, se proponen dos configuraciones alternativas basadas en un arreglo stand-by, dado que la teoría de la confiabilidad indica que este tipo de configuración permite mejorar este parámetro.

Las formas de incumplimiento de la función consideradas para el modelamiento de sistema de bombeo de gasoil actual y las configuraciones propuestas son:

- Bajada de carga: Cuando el sistema aún entrega caudal, pero por debajo del mínimo requerido debido a que solo una bomba (incapaz de cumplir la función por si sola) opera sin apoyo de otra bomba.
- Detención: Cuando ninguna bomba se encuentra operativa y, por lo tanto, no existe entrega de caudal.

A continuación, se presentan las dos alternativas de configuración propuestas, la cuales llevan por nombre “Sistema Propuesto 1” y “Sistema Propuesto 2”:

La Figura 39 muestra la representación en Diagrama de Bloques de Confiabilidad del Sistema Propuesto 1:

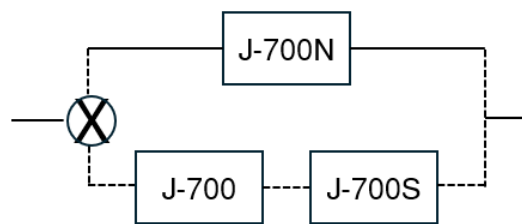


Figura 39. Representación en diagrama de bloques de Sistema Propuesto 1. Elaboración propia.

El Sistema Propuesto 1 considera la incorporación de una nueva bomba, denominada J-700N, la cual ya ha sido cotizada por la empresa. Su principal característica es que posee la capacidad de satisfacer por sí sola el requerimiento mínimo operacional de entregar 2400 [m³/día] de gasoil.

En esta configuración propuesta, el sistema actual pasa a operar como un subsistema que está en stand-by respecto a la J-700N. Es decir, permanecerá disponible para entrar en funcionamiento únicamente en caso de que la J-700N falle.

La Figura 40 muestra la representación del incumplimiento por bajada de carga del Sistema Propuesto 1.

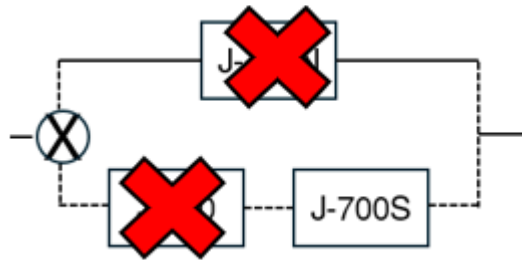


Figura 40 . Representación en diagrama de bloques de bajada de carga de Sistema Propuesto 1.

Elaboración propia.

La bajada de carga del Sistema Propuesto 1 ocurre cuando solo opera uno de los subsistemas J-700 o J-700S.

La Figura 41 muestra la representación del incumplimiento por detención total del sistema propuesto 1.

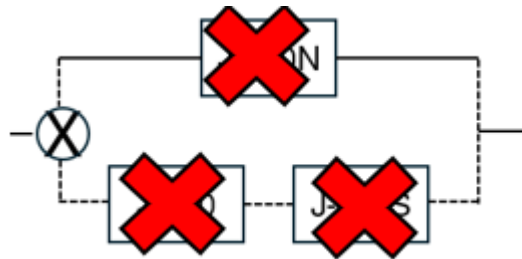


Figura 41. Representación en diagrama de bloques de confiabilidad para la detención total del Sistema Propuesto 1. Elaboración propia.

La detención total del Sistema Propuesto 1 ocurre cuando ni la bomba J-700N ni el subsistema conformado por J-700 y J-700S están operando.

Por otro lado, la Figura 42 muestra la representación del diagrama de bloques de confiabilidad del Sistema Propuesto 2

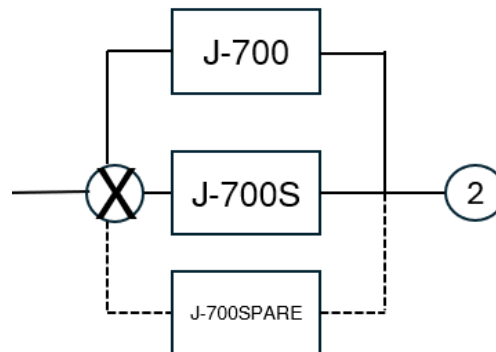


Figura 42. Representación en diagrama de bloques de confiabilidad del Sistema Propuesto 2.

Elaboración propia.

La configuración del Sistema Propuesto 2 incorpora la bomba J-700SPARE, actualmente considerada como la bomba en taller, la cual, actualmente, debe ser instalada en la planta en caso de que alguna bomba del sistema de bombeo de gasoil falle. La J-700SPARE es considerado como un nuevo subsistema, ya que dentro del estudio a este se le considera su motor, bomba centrífuga y sistema de lubricación. La justificación de esto último se detalla posteriormente en suposiciones y consideraciones de las simulaciones de los sistemas propuestos.

En este sistema propuesto, considera que para cumplir la función dos de los tres subsistemas representados en el sistema deben estar funcionando, mientras que la bomba restante permanecerá en modo stand-by.

La Figura 43 muestra la representación de la bajada de carga del Sistema Propuesto 2,

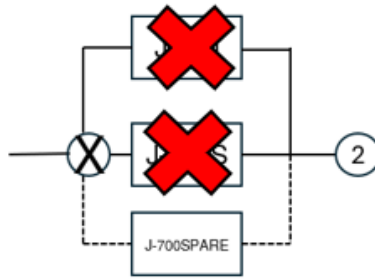


Figura 43. Representación en diagrama de bloque de bajada de carga de sistema propuesto 2.

Elaboración propia.

La bajada de carga en el Sistema Propuesto 2 ocurre cuando hay dos subsistemas detenidos, es decir, solo uno operando.

La representación de la detención total del Sistema Propuesto 2 se muestra en la Figura 44.

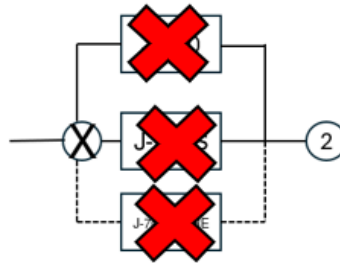


Figura 44. Representación en diagrama de bloque de detención total del sistema propuesto 2.

Elaboración propia.

La detención total del Sistema Propuesto 2 implica que ninguno de los subsistemas está operativo.

3.2 Suposiciones y consideraciones para la simulación de sistemas propuestos

Para la modelación y simulación de las configuraciones propuestas, se emplean las mismas suposiciones y consideraciones establecidas previamente para el sistema actual,

incorporando además algunas adicionales asociadas a las condiciones operativas y a los equipos incorporados en las nuevas configuraciones propuestas.

Es importante destacar que estas suposiciones y consideraciones influyen directamente en los resultados obtenidos, por lo tanto, deben interpretarse como estimaciones referenciales y no como una representación exacta que garantiza el comportamiento futuro del sistema.

Las suposiciones y consideraciones para la simulación de los sistemas propuestos se detallan a continuación:

- Consideraciones operativas para la simulación.
 - 1) Horizonte temporal de simulación: Se establece un periodo de simulación de cuatro años (35040 horas), correspondiente al intervalo típico entre paros de planta programados en la instalación analizada. Esto permite representar un ciclo operativo bajo condiciones de funcionamiento continuo.
 - 2) Número de iteraciones: Se realizan 10000 iteraciones durante la simulación. Esta cantidad de repeticiones tiene como propósito aumentar la robustez estadística de los resultados, reduciendo la variabilidad de las estimaciones de los parámetros RAM, haciéndolas más estables.
 - 3) Los conmutadores operan de manera ideal: Los conmutadores tienen la función de activar el equipo en condición de standby cuando el titular presenta una falla. Estos conmutadores no presentan fallas ni retrasos con un tiempo de conmutación de cero segundos.
 - 4) Estado “cold”: Los equipos que estén en standby se les configura como estado “cold” para que no disminuya su confiabilidad mientras no esté operando.
- Suposiciones relacionadas con la calidad de los datos.
 - 1) Clasificación del tipo de mantenimiento: Dado el nivel de incumplimiento de registros asociados a las categorías de mantenimiento, se asume que todos los eventos de detención que no corresponden a paros programados de planta se consideran mantenimiento correctivo. Esta suposición se

fundamenta en la práctica operativa de la planta, la cual opera bajo un régimen continuo (24/7) de alta exigencia, y donde la planificación de mantenimiento preventivo se concentra casi exclusivamente en los periodos de paro de la planta. La validez de este supuesto es respaldada por el equipo de planificación y por el personal técnico encargado del mantenimiento.

- 2) Duración de los tiempos de reparación, debido al nivel de incumplimiento del registro de datos correspondiente a las horas de mantenimiento activo y la mano de obra asociada, se considera que la duración total de cada evento de detención corresponde directamente al tiempo activo de reparación del componente afectado. Este criterio se adopta debido a que no existe una proporción documentada entre los tiempos administrativos, logísticos y efectivos de intervención. El personal técnico, desde su experiencia, indica que, en la mayoría de los casos, el tiempo registrado refleja predominantemente el tiempo real de intervención sobre el sistema.
 - 3) Asignación de modo de falla en los registros incompletos: Para los registros de los cuales se tiene conocimiento de la detención, pero sin datos sobre la causa o naturaleza de la falla, se asume que estas corresponden a fallas asociadas a fugas en el sello mecánico en las bombas centrífugas. Esto se fundamenta con la experiencia del personal técnico de mantenimiento, que señala que dicho modo de falla representa la mayor proporción de las detenciones históricas de los subsistemas analizados en el sistema actual de bombeo de gasoil.
- Criterios metodológicos para la estimación de parámetros y configuración del modelo de simulación para J-700 y J-700S.
 - 1) Clasificación de los registros del historial operacional: Se realiza con el software Reliasoft, donde cada evento se designa al modo de falla correspondiente. Cuando la detención coincide con el modo de falla en evaluación, el registro se clasifica como evento de falla. Por otra parte, cuando la detención se origina en otro modo de falla, se considera como

dato censurado a la derecha, entendiendo que la falla de interés no ocurre en el instante observado.

- 2) Estimación de parámetros y selección de distribuciones de probabilidad para cada modo de falla: La estimación de los parámetros de las distribuciones de falla se realiza mediante el módulo Distribution Wizard del software Reliasoft, el cual permite determinar las distribuciones que mejor representan el comportamiento de los datos mediante pruebas estadísticas. Se seleccionan los parámetros y distribuciones de probabilidad de falla que entregue el módulo Distribution Wizard.
- 3) Estimación de distribución para tiempos de reparación para cada modo de falla: La modelación de los tiempos de reparación se realiza adoptando la distribución de probabilidad Lognormal, en línea con la recomendación del autor Arata, quien destaca su uso frecuente para representar procesos de reparación debido a su capacidad para reflejar tanto variaciones habituales como variaciones accidentales del tiempo de intervención (Arata, 2009). Mediante el uso de Reliasoft, seleccionando la distribución Log normal y el conjunto de tiempos de reparación, se obtienen los parámetros característicos de esta distribución probabilística.
- 4) Representación del sistema en el modelo de simulación: Se desarrolla mediante el módulo Avsim de Availability Workbench, donde el sistema se modela mediante un Diagrama de Bloques de Confiabilidad (Figura 45 y 46).

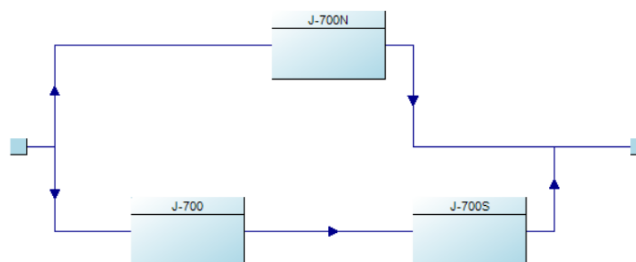


Figura 45. Modelamiento de Sistema Propuesto 1 en software. Elaboración propia.

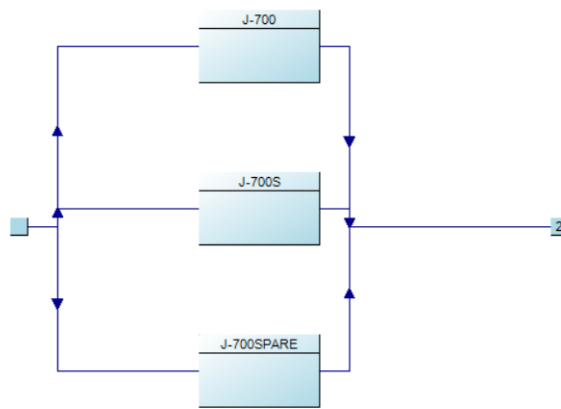


Figura 46. Modelamiento de Sistema Propuesto 2 en software. Elaboración propia.

Al igual que se hizo para el modelamiento de los modos de falla del sistema de bombeo actual, se realiza para el bloque J-700N y J-700SPARE, donde se considera que los bloques principales (J-700, J-700S y J-700SPARE) pierden su función cuando se presenta al menos un modo de falla asociado a dicho bloque.

Por justificaciones que se detallan posteriormente, a la J-700N solo se le asigna la fuga de sello mecánico y a la J-700SPARE se le asigna el mismo modelamiento de modos de falla que la J-700S (Figura 34). Nuevamente, las distribuciones probabilísticas de los modos de falla, sus parámetros característicos relacionados a la falla y a los tiempos de reparación son asignados según los que define la herramienta Distribution Wizard.

- 5) Parámetros estimados mediante la simulación: Los parámetros asociados al sistema METBF, MTTR, Confiabilidad (R), Disponibilidad (A) y tasa de falla se estiman mediante las simulaciones ejecutadas en el módulo Avsim del software Availability Workbench, utilizando los parámetros y distribuciones probabilísticas seleccionadas, junto con la configuración del Diagrama bloques de confiabilidad determinada.
- 6) Estimación de mantenibilidad general del sistema: Se realiza mediante la aproximación de la fórmula (4), aplicando el MTTR del sistema, el cual es estimado por el software Availability Workbench. Se determina que la

mantenibilidad se evaluará para recuperar la función en el intervalo de una semana. La elección de este intervalo se tiene como referencia porque dicho horizonte resulta operacionalmente significativo, ya que corresponde al periodo durante el cual la planta puede sostener una bajada de carga sin que la producción entre un estado crítico.

- Suposiciones para J-700N y J-700SPARE:

- 1) Datos sobre J-700N: Como no se tiene historial de vida de la nueva bomba en el Sistema Propuesto 1, se recurre a recomendaciones del libro OREDA 2002 y a la garantía de la bomba.

Para la J-700N se considera únicamente el componente correspondiente a la bomba centrífuga, ya que la empresa solo dispone información de la cotización de este equipo, mientras que los demás elementos del subsistema son de carácter confidencial.

Se toma en consideración que su distribución probabilística de falla es la exponencial negativa con un MTBF constante que corresponde a los cuatro años de garantía que asegura el proveedor de la bomba (cuatro años). Esta decisión se toma ya que no se tiene un historial o conjunto de datos de falla de este equipo.

Según los datos de OREDA 2002, el tiempo máximo de reparación registrado para bombas centrífugas que operan con gasoil es de 179 horas-hombre (Figura 28). Si bien esta unidad corresponde estrictamente a horas-hombre, los técnicos señalan que, basado en su experiencia, resulta más prudente considerar dicho valor como una aproximación del tiempo medio de reparación convirtiéndolo a hora de reparación activa. Esto se debe a que el otro valor de reparación activa reportado por OREDA, de 7,3 horas (Figura 28), es considerado por los técnicos como poco representativo de la realidad, especialmente porque la bomba nueva (J-700N) presenta una mayor complejidad de mantenimiento debido a su capacidad incrementada (la cual cumple por sí sola con el caudal mínimo requerido del sistema) y al contexto operativo de la empresa, donde se exige rapidez en las tareas de

mantenimiento, pero en la práctica esto no siempre es posible debido a las condiciones operativas y logísticas propias del proceso de mantenimiento. El modo de falla asignado a la bomba nueva es la fuga de sello mecánico, dado que los sellos mecánicos son el componente con mayor incidencia dentro de la categoría “External Leakage” reportada por OREDA.

- 2) Datos sobre J-700SPARE: No se dispone de información específica sobre la bomba J-700SPARE, ya que en las fuentes de información consultadas no existe registro que identifique explícitamente este equipo ni datos asociados a sus detenciones bajo dicho TAG.

Según la información obtenida en entrevistas al personal del área de planificación y del personal técnico de mantenimiento, esta situación se debe a que la J-700S y la J-700SPARE comparten el mismo TAG anotado en la placa de identificación de los equipos, diferenciándose únicamente por una letra grabada en la carcasa.

Dado lo anterior, se opta por replicar los datos, suposiciones y consideraciones utilizadas para el subsistema J-700S en el modelamiento de la J-700SPARE, tratando a esta como un nuevo subsistema (bomba centrífuga, motor y sistema de lubricación) pero con idénticos modos de falla, distribuciones de probabilidad y parámetros asociados que la J-700S (Detalladas en Anexos 3).

3.3 Resultados de la simulación de los sistemas propuestos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para las configuraciones propuestas, con el propósito de comparar su desempeño frente al sistema de bombeo de gasoil actual en término de parámetros RAM. El análisis comparativo busca determinar el impacto de las reconfiguraciones sugeridas sobre el comportamiento operativo del sistema y su capacidad para cumplir con la función requerida.

Es importante recalcar que los resultados expuestos se obtienen a partir de las suposiciones y consideraciones establecidas previamente, las cuales fueron necesarias ante las limitaciones en la información disponible. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como estimaciones teóricas del comportamiento de los sistemas analizados, que no representan con total exactitud los resultados que podrían obtenerse en caso de implementarse el proyecto en la planta real.

Una vez que se realiza la simulación, se obtienen los resultados de los parámetros RAM por cada sistema, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Resultados de simulación para sistema actual y propuestos.

Sistema	METBF [h]	MTTR [h]	R (35040 [h])	A (35040 [h])	M (168 [h])	Tasa falla/año
Actual	$1,63 \times 10^3$	189,90	0,00%	88,36%	58,72%	5,37
Propuesto 1	$9,82 \times 10^4$	105,60	70,91%	99,90%	79,63%	0,09
Propuesto 2	$1,04 \times 10^4$	101,00	5,90%	99,03%	81,05%	0,84

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se presenta el análisis de cada uno de los parámetros en base a los resultados que se muestran en la Tabla 4:

- El Sistema Propuesto 1 alcanza un METBF que es 60,25 veces el del sistema actual, mientras que el Sistema Propuesto 2 llega a un valor de 6,38 veces el obtenido con la configuración vigente.

El aumento en METBF del Sistema Propuesto 1 se debe a que la pérdida de función del sistema se presenta mínimamente en la situación en que la bomba nueva y uno de los subsistemas del sistema en stand-by experimenta una falla

de manera conjunta. Dado que la bomba nueva (J-700N) cuenta con una garantía que cubre la totalidad del periodo de evaluación y simulación, este factor incide directamente en el resultado del METBF del Sistema Propuesto 1, cuyo valor resultante supera incluso las 35040 horas considerados dentro del análisis. Este comportamiento se explica porque el Software Availability Workbench, al aplicar métodos probabilísticos, busca obtener la estimación más precisa posible, incluso cuando dicha estimación excede el horizonte temporal definido para la simulación.

Por otro lado, en el Sistema Propuesto 2, la incorporación de un subsistema adicional (J-700SPARE) en terreno, bajo una configuración en stand-by permite que el sistema retome su operación de manera inmediata en la simulación ante la falla de cualquiera de las bombas en funcionamiento. Esta característica se refleja en el valor estimado del METBF, que resulta ser aproximadamente 6,38 veces el valor del sistema actual

- En los Sistemas Propuestos 1 y 2 el MTTR es disminuido con respecto al sistema actual en un 44,39% y 46,81% respectivamente.

El Sistema Propuesto 2 incorpora una configuración en stand-by, en la cual el subsistema que anteriormente permanecía inactivo pasa a operar mientras que el subsistema que presenta una falla es sometido a reparación. En el caso de que ocurra una nueva falla, el subsistema que se encontraba en mantenimiento se encuentra en proceso de restitución o disponible para reincorporarse a la operación, lo que modifica la condición de ocurrencia de los estados de incumplimiento de función, que es cuando se empieza a contabilizar los tiempos para obtener el indicador MTTR.

Para el Sistema Propuesto 1, se considera que la bomba nueva (J-700N), al contar con garantía durante el periodo de evaluación, se mantiene la condición de operación continua dentro de los cuatro años simulados y, en caso de producirse una falla, su tiempo de reparación se mantiene constante en 179 horas. La relación entre la tasa de falla reducida en un 98,32% y un tiempo de reparación prolongado influye en la estimación del indicador MTTR, al

concentrar su valor en los eventos de reparación que efectivamente se producen dentro del periodo analizado.

- Para el Sistema Propuesto 1, en cuanto al indicador de confiabilidad, el análisis indica que la probabilidad de cumplimiento de la función durante el periodo simulado (35040 horas) aumenta con respecto al sistema actual en 70,91 puntos porcentuales. Este resultado se asocia a la condición de garantía de la bomba nueva, la cual abarca todo el periodo de la simulación y determina su participación continua en la operación. Adicionalmente, la pérdida de función del sistema solo ocurre en el caso de presentarse la falla de la bomba nueva y en alguno de los subsistemas que conforman el conjunto en stand-by, condición que define la ocurrencia de los eventos de incumplimiento durante el periodo evaluado.

En el Sistema Propuesto 2, los tres subsistemas considerados presentan un grado de uso previo que se incorpora en la simulación como parte de su historial operativo, lo que incide en el comportamiento del sistema al momento de cumplir su función. Por otra parte, la configuración en stand-by determina el modo en que el sistema mantiene su capacidad funcional frente a la ocurrencia de fallas en alguno de sus componentes. De acuerdo con los resultados obtenidos, el sistema presenta un aumento de probabilidad de cumplimiento de la función en 5,90 puntos porcentuales respecto al sistema actual durante el periodo simulado

Para visualizar cómo se comporta la confiabilidad en el tiempo durante los cuatro años simulados se realiza un gráfico (Figura 47) con la curva de confiabilidad en base a los valores de confiabilidad que entrega el software Availability Workbench en cada intervalo durante el periodo estipulado.

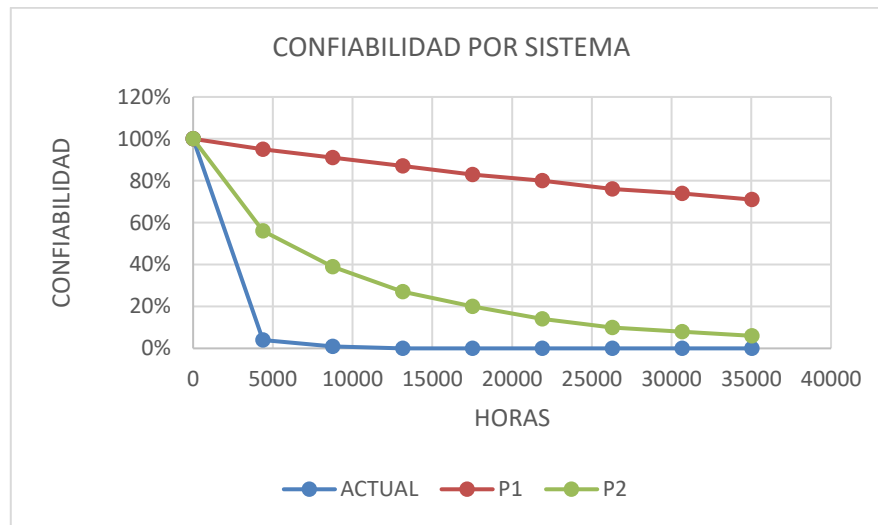


Figura 47. Gráfico de confiabilidad de sistemas actual y propuestos. Elaboración propia

Como lo muestra la Figura 47, la tendencia que se observa al cuarto año de simulación se mantiene en los años anteriores, conforme a las características de diseño y operación consideradas en cada caso.

- Según los resultados mostrados en la Tabla 4, en cuanto al indicador de disponibilidad, el Sistema Propuesto 1 presenta un aumento de 11,54 puntos porcentuales en la probabilidad de encontrarse cumpliendo la función durante el periodo simulado (35040 horas) con respecto al sistema actual, mientras que el Sistema Propuesto 2 aumenta esta probabilidad en 10,67 puntos porcentuales. Este comportamiento se vincula con la forma en que las configuraciones con stand-by administran los intervalos de cumplimiento e incumplimiento de función, diferenciándose del desempeño observado en el sistema actual con configuración en serie.
- Los sistemas propuestos 1 y 2 tienen mayor probabilidad de recuperar su función en el intervalo de una semana (168 horas) en comparación con el sistema de bombeo de gasoil actual. La variación corresponde a un aumento de 20,91 y 22,33 puntos porcentuales, respectivamente, en comparación al sistema actual.

Para analizar lo que ocurre en diferentes intervalos de tiempo, incluyendo el periodo de una semana, la mantenibilidad de cada sistema se representa

mediante Figura 48 haciendo la aproximación mediante la distribución exponencial con la fórmula (4), teniendo en cuenta la consideración para obtener mantenibilidad general para sistemas en los criterios metodológicos mencionados anteriormente.

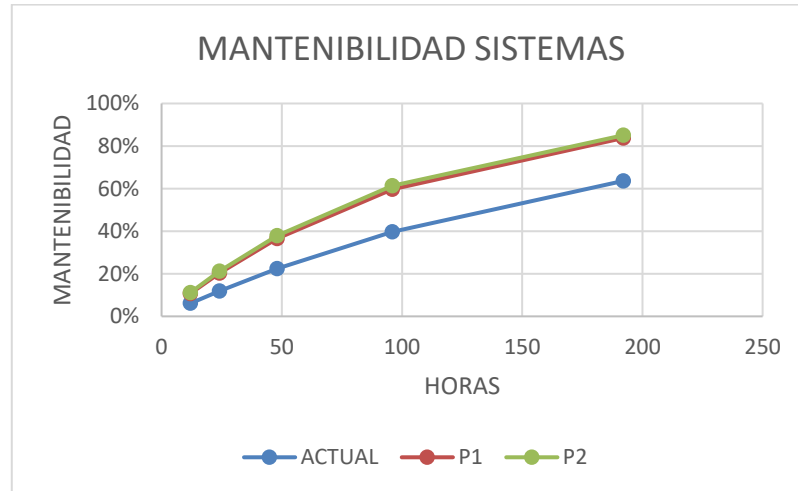


Figura 48. Gráfico de mantenibilidades de sistemas actuales y propuestos. Elaboración propia.

Independiente el intervalo de tiempo en específico, debido a los valores MTTR de cada sistema, las configuraciones propuestas ofrecen la opción de mejorar la probabilidad de restaurar la función del sistema. Los propuestos muestran tiempos medios de reparación con valores próximos entre sí, lo que refleja en probabilidades de restauración como resultados semejantes.

- Finalmente, se disminuyen las tasas de fallas del sistema o incumplimiento de su función en los propuestos en comparación con el sistema actual. En ambos casos la tasa de falla es menor a una falla por año.

En base a los resultados mostrados en la Tabla 4, la tasa de falla del Sistema Propuesto 1 es tal que resulta ser 0,02 veces la tasa de falla del sistema de bombeo actual. Esto es debido que en el Sistema Propuesto 1 se tiene la garantía de funcionamiento de la bomba nueva y la incorporación del sistema en stand-by en caso de falla. Por otra parte, la tasa de falla del Sistema Propuesto 2 es 0,16 veces la tasa de falla del sistema de bombeo actual. Esto se debe a que, en

este último sistema, se incorpora el subsistema J-700SPARE en terreno quedando en stand-by en caso de que falle algún subsistema de los que está funcionando.

4. Evaluación económica del sistema de bombeo de gasoil actual y de los sistemas propuestos

En este capítulo se desarrolla la evaluación económica de las configuraciones propuestas, con el propósito de complementar el análisis del desempeño de los parámetros RAM. Esto se realiza mediante una visión económica comparativa entre los sistemas propuestos y el sistema de bombeo de gasoil actual, lo que permite determinar la conveniencia financiera de las alternativas analizadas, considerando no solo un desempeño operativo, sino también los costos asociados a su ciclo de vida.

Para ello, se aplica el modelo de Woodward, método utilizado para la estimación del costo de ciclo de vida (LCC). El cálculo se realiza bajo un conjunto de suposiciones y consideraciones específicas, las cuales son necesarias debido a diferentes limitaciones de información y, en consecuencia, pueden influir en los valores obtenidos. Por ello, los resultados deben interpretarse como estimaciones teóricas que podrían diferir de los costos reales en caso de implementarse el proyecto.

Adicionalmente, se incorporan conceptos de Ahorro y Payback, los que se describen previamente en el marco teórico, con el fin de evaluar la viabilidad económica de las configuraciones propuestas. Estos indicadores se emplean en lugar de un análisis de ingresos monetarios, ya que el sistema de bombeo de gasoil no genera por sí solo directamente beneficios económicos cuantificables, sino que su impacto financiero se asocia principalmente a los costos operacionales y de mantenimiento.

4.1 Cálculo de LCC de sistema de bombeo de gasoil actual y sistemas propuestos

En esta sección se aplica el modelo de Woodward para estimar el costo de ciclo de vida (LCC) de las tres configuraciones analizadas: el sistema actual, Sistema Propuesto 1 y Sistema Propuesto 2. Este enfoque permite cuantificar los costos asociados a inversión, operación y mantenimiento, proporcionando una base objetiva para su comparación económica.

Para la aplicación del modelo se establecen una serie de suposiciones y consideraciones necesarias para adaptar la información disponible al modelo de Woodward.

Finalmente, se presentan y se analizan los resultados derivados de la aplicación del modelo de Woodward, los cuales son la base para el cálculo posterior de los indicadores de Ahorro y Payback.

4.1.1 Suposiciones y consideraciones para aplicar el modelo de Woodward

Para la aplicación del modelo de Woodward en el cálculo del costo del ciclo de vida (LCC), se establecen las siguientes suposiciones y consideraciones, las cuales permiten adaptar el modelo a la información disponible y a las condiciones operativas de los sistemas propuestos y el actual. Estas definiciones afectan directamente a los resultados obtenidos, por lo que deben interpretarse como estimaciones teóricas y no como valores certeros y exactos en caso de implementarse el proyecto.

Los costos asociados a reparación, penalización por no producción, mantenimiento preventivo y de adquisición de equipos nuevas no se detallan debido a que es información confidencial de la empresa.

- 1) Escenario de incumplimiento de la función: Como se detalla en anteriores secciones, el incumplimiento de la función puede presentarse como bajada de carga (sistema entrega un flujo menor al mínimo requerido) y la detención total (sistema no entrega caudal alguno).

La simulación entrega el número total de incumplimientos de la función durante el periodo analizado, sin distinguir entre bajada de carga o detención total del sistema. Este aspecto relevante debido a que el costo por penalización de no producción varía según el tipo de incumplimiento. Para la detención total se consideran un costo de penalización por no producción el cual es el doble que el costo de penalización por bajada de carga.

Para incorporar esta diferencia y que se refleje económicamente en el modelo de Woodward, se considera de manera arbitraria dos escenarios:

- Escenario optimista: 70% de las detenciones corresponde a bajadas de carga y 30% a detenciones totales.
- Escenario pesimista: 30% de las detenciones corresponde a bajadas de carga y 70% a detenciones totales.

- 2) Tasas de falla de los modos de falla y sistemas: Las tasas de falla constantes requeridas por el modelo de Woodward se obtienen a partir de las tasas generadas por el software de simulación Availability Workbench para cada modo de falla al año 4 de la simulación. Esto se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.

Tasa de falla de los modos de falla al cuarto año para cada sistema.

Modo De Falla	Tasa [falla/año] sistema actual	Tasa [falla/año] Sistema Propuesto 1	Tasa [falla/año] sistema Propuesto 2
Fuga Sello J-700	0,5305	0,0480	0,5415
Sobrecalentamiento Descanso J-700	0,1645	0,0012	0,1791
Sobrecalentamiento Motor J-700	0,0517	0,0042	0,0507
Fuga Flange J-700	0,7105	0,0032	0,7708
Vibraciones eje caja- bomba J-700	0,7050	0,0001	0,7668
Bajo nivel aceite tanque J-700S	0,0756	0,0033	0,0772
Fuga sello J-700S	3,1300	0,0290	3,2725
Bajo nivel aceite J- 700SPARE	-	-	0,0236
Fuga sello J- 700PSARE	-	.	0,4655
Fuga sello J-700N	-	0,2525	-

Nota. Elaboración propia.

Para las tasas de fallas necesarias y MTTR de los sistemas para obtener el coste de penalización por no producción, se utilizan los valores obtenidos en la simulación a los 4 años (Tabla 4).

El costo asociado a cada modo de falla se determina en base a los registros del sistema SAP, considerando las órdenes de trabajo vinculadas a cada tipo de evento.

- 3) Estrategia de mantenimiento: Durante el periodo de simulación correspondiente a cuatro años, no se consideran intervenciones de mantenimiento preventivo. Hay que recordar que este periodo corresponde al intervalo temporal entre que termina un paro de planta general y empieza el siguiente. Por lo tanto, se asume que al inicio del año 0 se ejecuta una actividad preventiva general en todos los sistemas comparados.

4) Parámetros económicos:

- La tasa de descuento aplicada es de 8%, valor definido según la recomendación del área de Confiabilidad, quienes establecen este porcentaje como referencia para proyectos de características similares dentro de la organización.
- El valor de adquisición de la nueva bomba en el Sistema Propuesto 1 corresponde al valor de la cotización de la empresa.
- Las bombas actualmente utilizadas se valoran en aproximadamente la mitad del costo de la bomba nueva, estimación utilizada también para las instalaciones asociadas.
- El costo de instalación de las bombas se estima en un 110% del valor del equipo.
- Se considera el costo anual de operación igual para todos los sistemas y un costo de mantenimiento preventivo igual para cada bomba.
- No se consideran mantenimientos mayores que incluyan a la totalidad de los equipos involucrados en cada sistema estudiado durante el horizonte de análisis

4.1.2 Resultados de LCC de sistema de bombeo de gasoil y sistemas propuestos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Woodward para la estimación del costo de ciclo de vida (LCC) de los sistemas de bombeo de gasoil actual, el sistema propuesto 1 y el sistema propuesto 2. Los cálculos se realizan considerando los escenarios optimistas y pesimistas definidos previamente, los cuales contemplan las diferentes proporciones de incumplimiento de la función por bajada de carga y detención total.

La aplicación del modelo de Woodward se hace mediante las fórmulas mencionadas y detalladas en el marco teórico, desde la (13) hasta la (17).

Los valores obtenidos permiten examinar las diferencias económicas entre cada configuración evaluada, considerando los costos de inversión, operación y mantenimiento. A partir de estos resultados, se realiza un análisis comparativo

destinado a identificar las variaciones más relevantes en el comportamiento económico global de cada sistema analizado, estableciendo una base cuantitativa para el cálculo de ahorro y payback en etapas posteriores.

La Figura 49 presenta un gráfico de los resultados del LCC de los sistemas analizados en cada año evaluado y simulado en el escenario optimista.

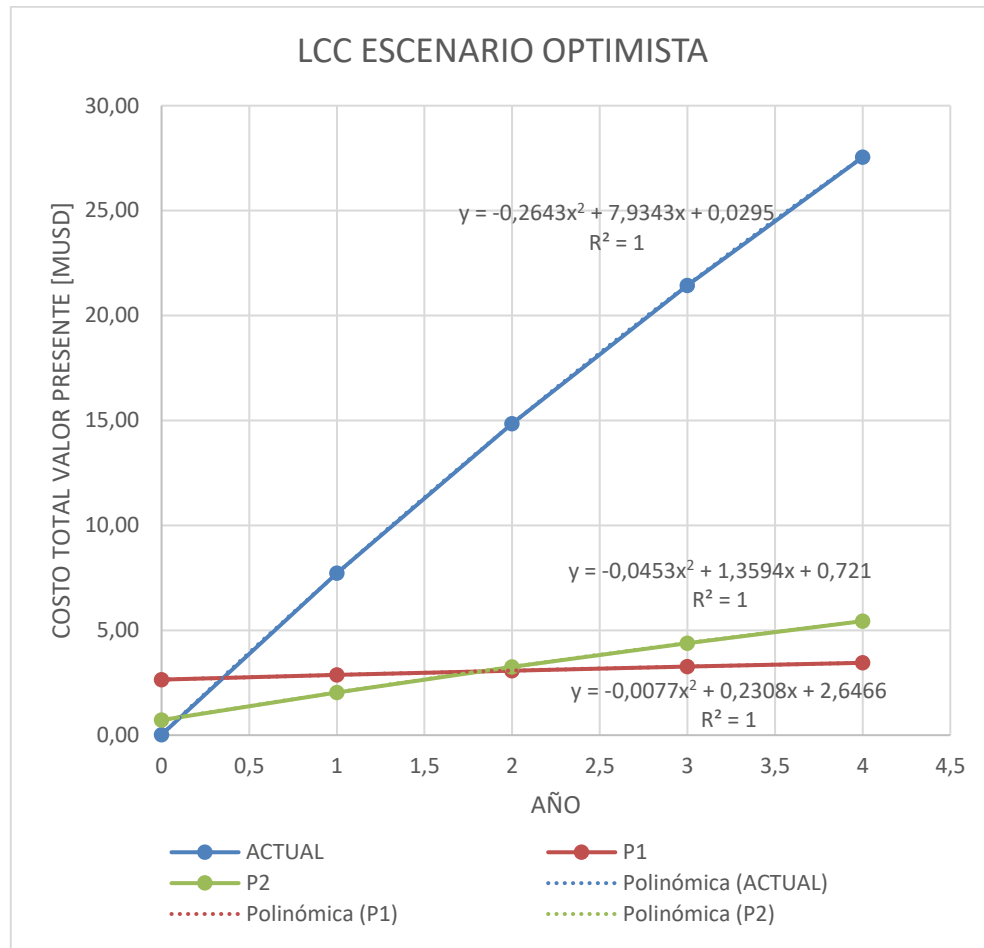


Figura 49. Gráfico LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario optimista. Elaboración propia.

El gráfico de la Figura 49 muestra la evolución de los costos en valor presente al largo del periodo de análisis. Durante gran parte del intervalo simulado, el sistema con configuración actual presenta una tendencia de costos diferenciada respecto de las configuraciones propuestas.

Para mayor detalle sobre el monto de los costos valor presente de cada sistema estudiado, se muestra la Tabla 6.

Tabla 6.

Detalle de LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario optimista.

LCC escenario optimista [MUSD/año]				
Año	Actual	Propuesto 1	Propuesto 2	Diferencia porcentual P2 c/r P1 [%]
0	0,02	2,65	0,72	-72,81
1	7,72	2,87	2,04	-29,00
2	14,84	3,08	3,26	5,88
3	21,44	3,27	4,39	34,24
4	27,55	3,45	5,44	57,58

Nota. Elaboración propia.

Según lo que muestra la Tabla 6, en el escenario optimista, durante el año 0 el Sistema Propuesto 1 tiene mayor costo asociado correspondiente a 2,65 [MUSD], debido al costo de compra e instalación de la bomba nueva que es capaz de cumplir por si sola la función del sistema en comparación con los costos que le corresponden a los otros sistemas. Para ese momento, al sistema actual solo se le asocia el costo al mantenimiento preventivo que se le hizo al finalizar el paro de planta planificado. Por otra parte, para el Sistema Propuesto 2, aparte del costo del mantenimiento preventivo, se le asocia el costo de instalación de la bomba ya comprada y que actualmente se encuentra en el taller de mantenimiento.

Para el año 1, los costos del sistema actual se ven determinados por las tasas de falla de los modos de falla, tasas de falla del sistema, tiempo medio de reparación y su configuración lógica. En este contexto, según los valores que muestra la Tabla 6, se

llega a que el costo del sistema actual corresponde a 2,69 veces el del Sistema Propuesto 1 y a 3,79 veces el del Sistema Propuesto 2.

Además, con los valores que muestra la Tabla 6 del escenario optimista, se obtiene que del año 0 al 1 el Sistema Propuesto 1 aumenta su costo solo en un 8,46%. Por otra parte, el costo total del Sistema Propuesto 2 en el año 1 llega a ser 2,83 veces el del año 0. Esta diferencia se debe a la incidencia que tiene las magnitudes de las tasas de falla para cada modo de falla, a que la tasa de falla del Sistema Propuesto 2 corresponde a 9,33 veces la del Sistema Propuesto 1 y a la diferencia que hay entre los MTTR de los sistemas propuestos, siendo mayor solo en un 4,55% el del Sistema Propuesto 1. Estos cálculos de los factores de razón entre valores y de las variaciones porcentuales mencionados anteriormente se obtuvieron de los valores presentes en la Tabla 4.

En el año 2, en base a los resultados que muestra la Tabla 6, se obtiene que el costo del sistema actual corresponde a 4,82 veces el del Sistema Propuesto 1, mientras que con respecto al Sistema Propuesto 2 corresponde a 4,55 veces.

Se destaca que ya para el año 2, el Sistema Propuesto 2 es un 5,88% mayor en costos con respecto al Sistema propuesto 1 (Tabla 6). En este intervalo de tiempo, se empiezan a reflejar los costos que conlleva tener mayores tasas de falla de los modos de fallas y tasa de falla para el Sistema Propuesto 2. Por ejemplo, con los resultados que muestra la Tabla 5, se llega a que la tasa de falla que tiene el sello J-700 en el Sistema propuesto 2 es 11,28 veces con respecto al sello J-700 del Sistema Propuesto 1, lo que incide en el resultado de costos por falla. A eso se le suma, nuevamente, que la tasa de falla del sistema en el Sistema Propuesto 2 corresponde a 9,33 veces la del Sistema Propuesto 1 (mediante cálculo con valores de la Tabla 4).

Mediante las aproximaciones polinómicas de las curvas, se obtiene que el sistema propuesto 1 y 2 tienen los mismos costos a los 1,81 años. A partir de ahí, los costos del Sistema Propuesto 2 empiezan a ser mayores.

Finalmente, para el año 3 y 4 se mantiene la tendencia identificada a partir del año 2. Al final del periodo de estudio (año 4) y a partir de los resultados que se muestran la

Tabla 6, se obtiene que el valor del costo total del Sistema Propuesto 1 es 87,49% inferior con respecto al sistema actual, mientras que el Sistema Propuesto 2 es 80,27% inferior. Por otro lado, el valor del costo total del Sistema Propuesto 2 es un 57,68% mayor que el del Sistema Propuesto 1 (Tabla 6). Dicho de otra forma, en base a los datos que muestra la Tabla 6, el costo del Sistema Propuesto 1 en el cuarto año es 36,58% menor con respecto al Sistema Propuesto 2.

Para el siguiente escenario, la Figura 50 muestra el gráfico de los costos de los sistemas para el escenario pesimista.

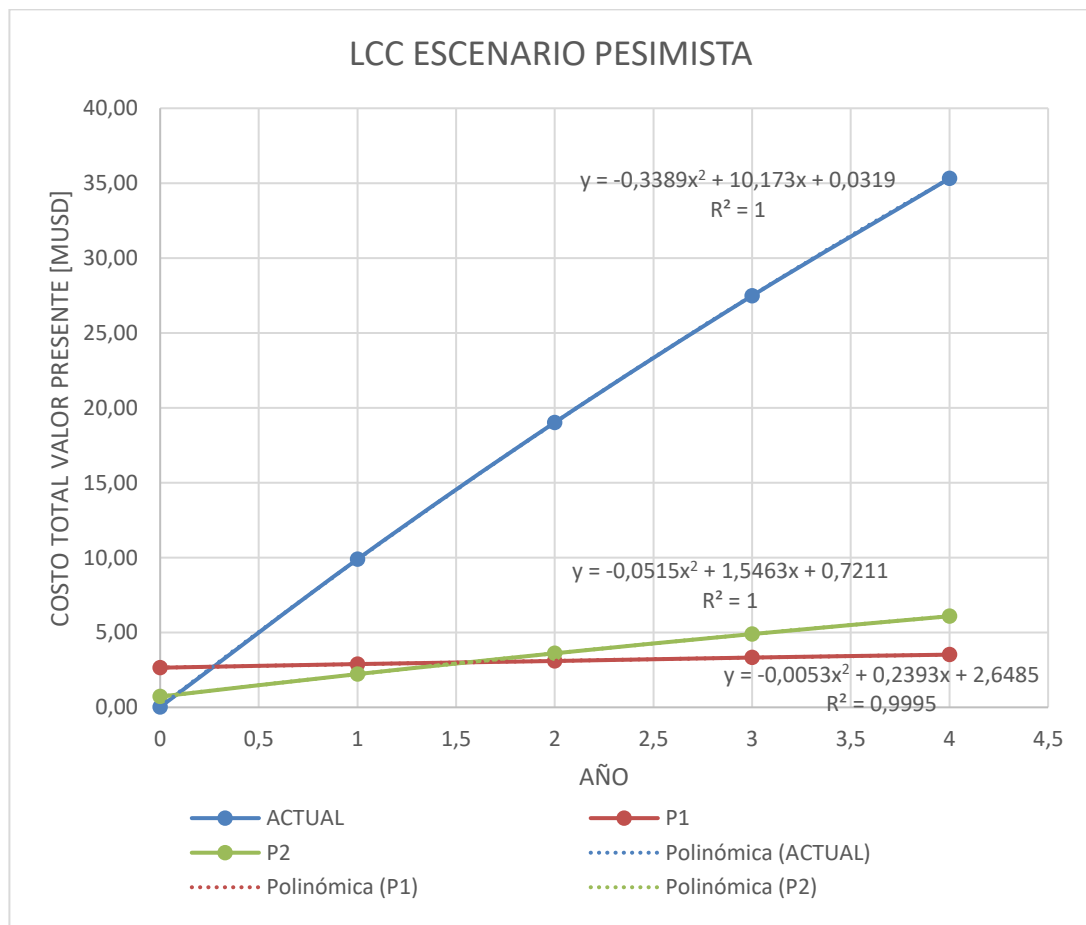


Figura 50. Gráfico de LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario pesimista.

Elaboración propia.

La forma y comportamiento de las curvas mostradas de la Figura 49 presentan similitudes con las que muestra la Figura 50.

La Tabla 7 muestra los detalles de los costos asociados durante el intervalo de tiempo estudiado.

Tabla 7.

Detalle de LCC año a año de sistema actual y propuestos en escenario pesimista.

LCC escenario pesimista [MUSD/año]				
Año	Actual	Propuesto 1	Propuesto 2	Diferencia porcentual P2 c/r P1 [%]
0	0,02	2,65	0,72	-72,81
1	9,89	2,89	2,22	-23,22
2	19,02	3,09	3,61	16,57
3	27,48	3,33	4,89	47,16
4	35,31	3,52	6,08	72,89

Nota. Elaboración propia.

Haciendo la comparativa entre los resultados de los escenarios que muestran Tabla 6 y 7, se llega a que, al cuarto año, el sistema actual del escenario pesimista es 28,19% mayor en costos con respecto al sistema actual del escenario optimista. En el mismo contexto, el del Sistema Propuesto 1 es mayor en costos en un 2,08%, mientras que el Sistema Propuesto 2 lo hace en 11,93%. Esto tiene sentido, teniendo en cuenta que para este escenario se estiman incumplimientos de función del sistema en su mayoría como detenciones totales, teniendo asociado un costo de dos veces mayor en comparación con las bajadas de carga.

Mediante la aproximación de las curvas con líneas de tendencia polinómica, en el escenario pesimista los costos del Sistema propuesto 1 y Sistema Propuesto 2 tienen

igual valor exactamente a los 1,56 años. Que se presente 0,25 años antes el punto en que el Sistema Propuesto 1 tiene el mismo valor de costo que el Sistema Propuesto 2 en el escenario pesimista, es también debido a la proporción de detenciones totales que hay en este escenario. En esta situación, asociar la proporción mayoritaria (70%) de detenciones totales a la tasa de falla del sistema, implica mayores costos asociados a la penalización por no producción desde el año 0. Por otra parte, el Sistema Propuesto 1 no se ve tan afectado porque sus tasas de fallas de sus modos de fallas y del sistema son menores en comparación con el Sistema Propuesto 2. A partir de los valores que se presentan en la Tabla 5, se obtiene que la tasa de falla del sello J-700 en este último sistema corresponde a 11,28 veces la de la tasa de falla del sello de la J-700 en Sistema Propuesto 1, además de tener una tasa de falla de sistema que es 9,33 veces la de ese mismo sistema (cálculo ya mencionado anteriormente).

Por lo tanto, teniendo el Sistema Propuesto 2, mayores costos por penalización en cada año de este escenario pesimista y variaciones mínimas en los costos totales del Sistema Propuesto 1 por sus tasas de falla menores en los modos de falla, es que este empieza a ser más conveniente desde antes.

Al final del año de evaluación (cuarto año), a partir de los valores de los costos del escenario pesimista mostrados en la Tabla 7, se obtiene que el valor de costo total del Sistema Propuesto 1 es un 90,03% inferior al del sistema actual, mientras que el Sistema Propuesto 2 es un 82,77% inferior al de la configuración actual. Por otro lado, el costo total del Sistema Propuesto 2 es un 72,89% mayor que el del Sistema Propuesto 1. Dicho de otra forma, en base a los datos que muestra la Tabla 7, en el cuarto año el costo del Sistema Propuesto 1 es 42,16% menor al Sistema Propuesto 2.

En el escenario optimista y pesimista, el sistema actual y el Sistema Propuesto 2 se ven afectados por la magnitud de las tasas de falla del sistema, las tasas de falla de cada modo de falla y del tiempo medio de reparación en comparación con el Sistema Propuesto 1. Por ejemplo, en base a los resultados de la Tabla 5, se obtiene que para el modo de falla de la fuga de sello mecánico en el subsistema J-700 en el Sistema Propuesto 1, la tasa de falla en el sistema actual es 2,10 veces la del sello mecánico de

la J-700N, que es la que es capaz de cumplir la función del sistema por si sola. Haciendo la misma comparación, en el Sistema Propuesto 2 la tasa de falla de este modo de falla para la J-700 corresponde a 2,14 veces la del Sistema Propuesto 1 en la J-700N. Por lo tanto, al tener mayor tasa de falla, se tienen mayores costos asociados a fallas de los equipos involucrados. Además, el tiempo medio de reparación afecta en la cantidad de tiempo de no producción, donde el sistema actual tiene un MTTR 79,83% mayor con respecto al Sistema Propuesto 1, mientras que el Sistema Propuesto 2 es menor solo en un 4,36% con respecto a ese mismo sistema (calculado en base a los valores mostrados en Tabla 4). Estos porcentajes de variación marcan la diferencia, haciendo que el Sistema Propuesto 1 se vea conveniente en cuanto a costos durante gran parte del periodo de evaluación.

La Tabla 8 muestra el detalle de los costos por categoría al cuarto año evaluado, las cuales corresponden a costo inicial (CI), costo de operación (CO), costo por mantenimiento preventivo (CMP) y costo por falla (CMP) y total (suma de los costos).

Tabla 8.

Detalle de los costos por categoría en el cuarto de evaluación para los escenarios optimista y pesimista.

Costo [MUSD]	Escenario optimista			Escenario pesimista		
	Actual	P1	P2	Actual	P1	P2
CI	0,00	2,63	0,69	0,00	2,63	0,69
CO	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
CMP	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03
TCPf	27,13	0,40	4,32	34,89	0,48	4,97
TOTAL	27,55	3,45	5,44	35,31	3,52	6,08

Nota. Elaboración propia.

En base a los resultados que se muestran en la Tabla 8, se calcula que, en el escenario optimista durante el cuarto año de evaluación, el costo por falla para el sistema actual corresponde al 98,48% del total de costos del LCC, mientras que para el Sistema Propuesto 2 el costo por falla corresponde al 79,45% del total de costos de su LCC. Por otro lado, para el Sistema Propuesto 1, el costo inicial durante su cuarto año de evaluación corresponde al 76,15% del total de costos en su LCC.

En el escenario pesimista, para el cuarto año de evaluación en base a los resultados de la Tabla 8, se obtiene que el costo por falla para el sistema actual corresponde al 98,81% del total de costos en su LCC, mientras que para el Sistema Propuesto 2 el costo por falla es el 81,64% del total de costos asociados a su LCC. Para el Sistema Propuesto 1, el costo inicial durante su cuarto año de evaluación corresponde al 74,60% del total de costos en su LCC.

Además, se considera que, bajo el escenario optimista, el costo asociado a penalización por no producción (constante pero actualizado a valor presente año a año) durante los cuatro años del periodo de evaluación alcanza, en el sistema actual, un valor de 8,19 [MUSD], lo que representa el 93,03% del costo total por falla. En el caso del Sistema Propuesto 1, el costo por no producción corresponde 0,07 [MUSD], equivalente a 57,81% del costo total por falla, mientras que para el Sistema Propuesto 2 se obtiene un valor de 0,64 [MUSD] correspondiente al 48,80% del costo por falla en ese sistema propuesto.

De manera similar para el caso del escenario pesimista en el mismo periodo evaluado, el costo por penalización de no producción (constante pero actualizado a valor presente año a año) en el sistema actual alcanza un valor de 9,96 [MUSD], siendo un 94,58% del costo por falla. El Sistema Propuesto 1 presenta un costo por no producción de 0,09 [MUSD], lo que corresponde un 64,18% del total de costo por falla. Finalmente, para el Sistema Propuesto 2 el costo por no producción corresponde a 0,83 [MUSD], representando el 55,48% del costo total por falla.

En base al análisis anterior, es importante destacar que la tasa de falla de los modos de falla, la tasa de falla del sistema y los tiempos medios de reparación son factores

fundamentales en los resultados del análisis económico, ya que los costos asociados a las fallas representan una de las principales componentes del costo de ciclo de vida (LCC). En este sentido, una mayor tasa de falla de los modos de falla y del sistema, junto con mayores tiempos medios de reparación, implica unas mayores pérdidas económicas por mantenimiento y penalizaciones de no producción.

4.1.3 Resultados de Ahorros de Costos generados por los sistemas propuestos

En esta sección se cuantifican los ahorros de costos asociados a la implementación de los sistemas propuestos. Si bien el concepto de Ahorro de Costos se define y formula en el marco teórico, se reitera en esta sección para contextualizar su aplicación en la evaluación económica.

El ahorro de costos se calcula como la diferencia entre el costo de ciclo de vida (LCC) del sistema de bombeo de gasoil actual, y el LCC del sistema propuesto evaluado en un año específico. Se utiliza la fórmula (18).

La diferencia resultante representa el gasto que se evita al implementar el sistema propuesto. De esta manera, el ahorro económico refleja de una forma aproximada el beneficio financiero de la actualización del sistema.

La Tabla 9 muestra en detalle los ahorros de costos durante los 4 años evaluados para los sistemas propuestos en los escenarios optimistas y pesimistas.

Tabla 9.

Detalle de ahorros de costos de los sistemas propuestos en escenarios optimista y pesimista.

	Ahorro escenario optimista [MUSD/año]		Ahorro escenario pesimista [MUSD/año]		Diferencia porcentual P1 c/r P2 [%]	Diferencia porcentual P1 c/r P2 [%]
Año	Sistema P1	Sistema P2	Sistema P1	Sistema P2	Escenario optimista	Escenario pesimista
1	4,85	5,68	7,00	7,67	-14,66	-8,75
2	11,76	11,58	15,93	15,41	1,56	3,33
3	18,17	17,05	24,15	22,59	6,57	6,94
4	24,10	22,11	31,79	29,23	8,99	8,78

Nota. Elaboración propia

Como muestran los resultados de la Tabla 9, el ahorro de costos de los sistemas propuestos en el escenario pesimista siempre es mayor año a año dentro de los 4 años evaluados. Por ejemplo, en base a los resultados de esa tabla, se obtiene que durante el año 4 el ahorro de costos del Sistema Propuesto 1 en el escenario pesimista es 31,92% mayor con respecto a su ahorro en el escenario optimista. Por otro lado, durante el año 4 el ahorro de costos del Sistema propuesto 2 en el escenario pesimista es 32,19% mayor con respecto al ahorro de costos en el escenario optimista. Esto se debe, nuevamente, a la proporción de detenciones totales del sistema al número de incumplimiento de función de los sistemas propuestos y las magnitudes de las tasas de falla de modo de falla e incumplimientos del sistema en cada sistema.

En la Tabla 9 se observa que, en el escenario optimista, durante el año 2, el ahorro de costos del Sistema Propuesto 1 ya es mayor en comparación con el sistema propuesto 2, específicamente en un 1,56%. Situación similar ocurre en el escenario pesimista,

nuevamente durante el año 2, donde el sistema propuesto 1 ya es mayor en comparación con el sistema propuesto, específicamente en un 3,33%.

Para obtener el tiempo específico en que el ahorro de costos del Sistema Propuesto 1 empieza a ser mayor que el Sistema Propuesto 2, se grafican las curvas de ahorro de costos en ambos escenarios durante año asignándole una aproximación de función polinómica. Las gráficas corresponden a las Figuras 51 y 52.

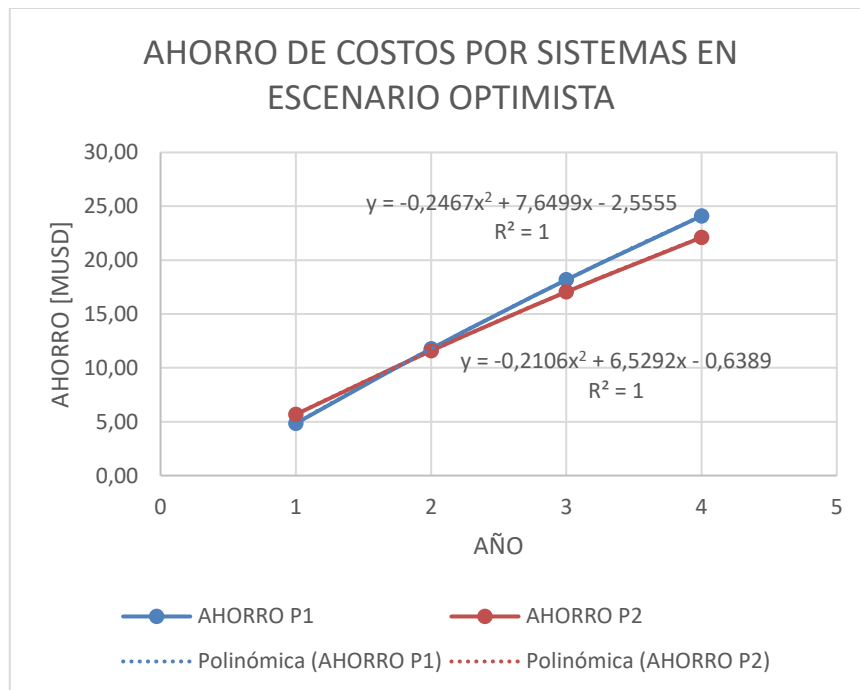


Figura 51. Gráfico de ahorro de costos por sistemas en escenario optimista. Elaboración propia.

En base a la gráfica de la Figura 51 y sus aproximaciones polinómicas, se obtiene que el tiempo en que los ahorros de costos del sistema propuesto 1 y sistema propuesto 2 se igualan en el escenario optimista corresponde a 1,82 años.

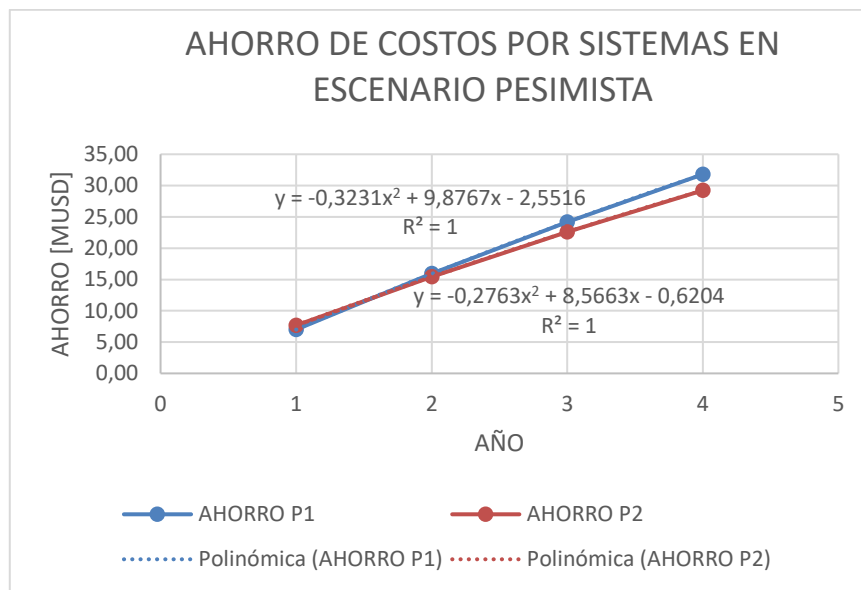


Figura 52. Gráfico de ahorro de costos por sistemas en escenario pesimista. Elaboración propia.

Para la Figura 52, en el escenario pesimista se obtuvo que el sistema propuesto 1 y 2 igualan su ahorro de costos a los 1,56 años.

Entonces, en el escenario pesimista el Sistema Propuesto 1 empieza a tener mayor ahorro de costos 0,26 años antes, es decir, aproximadamente 3 meses.

Que se presente mayores ahorros del Sistema Propuesto 1 en el escenario pesimista se debe a que se adjudican mayores proporciones de detenciones total al incumplimiento del sistema con respecto al escenario optimista. En este caso, durante el año 2 y en base a los resultados que muestran las Tablas 6 y 7, haciendo la comparativa entre escenarios, el sistema actual tiene un LCC 28,17% mayor en el escenario pesimista, mientras que el Sistema Propuesto 2 lo hace en un 10,71% y el Sistema Propuesto 1 en un 0,56%. Por lo tanto, el valor del LCC del Sistema Propuesto 2 se acerca más al valor del LCC del sistema actual, mientras que el LCC de Sistema Propuesto 1 se aleja del de la configuración actual. Esto, se traduce en mayores diferencias de LCC (fórmula de ahorro de costos) entre el sistema actual y el Sistema Propuesto 1 y que los valores del LCC entre los sistemas propuestos se igualen antes.

4.1.4 Resultados de Payback de sistemas propuesto

El concepto de payback se define en el marco teórico, pero en esta sección se contextualiza su aplicación dentro del análisis económico de los sistemas propuestos.

El payback corresponde al periodo de retorno de inversión, en este caso, al tiempo necesario para que los ahorros de costos acumulados generados por la implementación del sistema propuesto son iguales a la inversión inicial realizado en el año 0.

Dado que los ahorros representan la reducción de costos operacionales respecto al sistema actual, estos se van acumulando año a año. Por lo tanto, el ahorro acumulado de un determinado año corresponde a la suma de los ahorros anuales obtenidos hasta ese momento.

De esta forma, el payback se alcanza cuando el ahorro acumulado iguala (o supera) el monto invertido inicialmente, momento en el cual la inversión puede considerarse recuperado. Este enfoque permite establecer una analogía con los proyectos de inversión tradicionales, donde los beneficios económicos obtenidos igualan a la inversión realizada inicialmente.

El ahorro acumulado generado por lo sistemas propuestos en cada año y escenario se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.

Detalle de ahorros de costos acumulados de los sistemas propuestos en escenarios optimista y pesimista.

	Ahorro acumulado escenario optimista [MUSD/año]		Ahorro acumulado escenario pesimista [MUSD/año]		Diferencia porcentual P1c/r P2 [%]	
Año	Sistema P1	Sistema P2	Sistema P1	Sistema P2	Escenario optimista	Escenario pesimista
1	4,85	5,68	7,00	7,67	-14,66	-8,75
2	16,61	17,26	22,92	23,08	-3,77	-0,69
3	34,78	34,31	47,08	45,67	1,36	3,09
4	58,88	56,42	78,87	74,89	4,35	5,31

Nota. Elaboración propia.

En base a los valores de los ahorros acumulados que muestra la Tabla 10, el ahorro de costos acumulado durante los 4 años de estudio es siempre mayor en el escenario pesimista, debido a que los incumplimientos de los sistemas en este escenario tienen una proporción mayoritaria de 70% correspondiente a detenciones totales del sistema. La mayor variación de ahorros acumulados entre escenarios con respecto a sus mismos sistemas propuestos se alcanza el año 1 según los valores mostrados en la Tabla 10, Se obtiene, en base a esos valores, que el Sistema Propuesto 1 tiene un ahorro acumulado un 44,38% mayor en el escenario pesimista con respecto al escenario optimista y el Sistema Propuesto 2 es un 35,04% mayor en ese mismo contexto.

Además, como los valores de la Tabla 10 al final del año de evaluación (año 4) indican que el sistema propuesto que tiene mayor ahorro acumulado es el Sistema Propuesto 1. Se obtiene que en el escenario optimista y con respecto al Sistema Propuesto 2 es mayor en un 4,35% y en el escenario pesimista un 5,31%. Las razones que explican esta situación son las mismas por las que se explica su ahorro de costos o diferencia de LCC. La magnitud de las tasas de falla de los modos de falla y tasa de falla del sistema

hace que se tenga un mayor ahorro durante gran parte del periodo de evaluación (Tabla 9). Como este ahorro se va acumulando, esto se refleja en la diferencia de ahorro acumulado con el Sistema Propuesto 2.

Para calcular el payback o periodo de retorno de inversión donde el ahorro acumulado iguala a la inversión inicial, en las Figura 53 y 54 se grafican las curvas de los resultados de los ahorros acumulados año a año para cada escenario.

Con las líneas de tendencia que se muestran en la Figura 53, se iguala cada función al valor de su costo de inversión según el sistema propuesto que corresponde, para así obtener el tiempo de payback. En el escenario optimista, el ahorro acumulado llega al mismo valor que la inversión inicial a los 0,73 años para el Sistema Propuesto 1 y a los 0,59 años para el Sistema Propuesto 2.

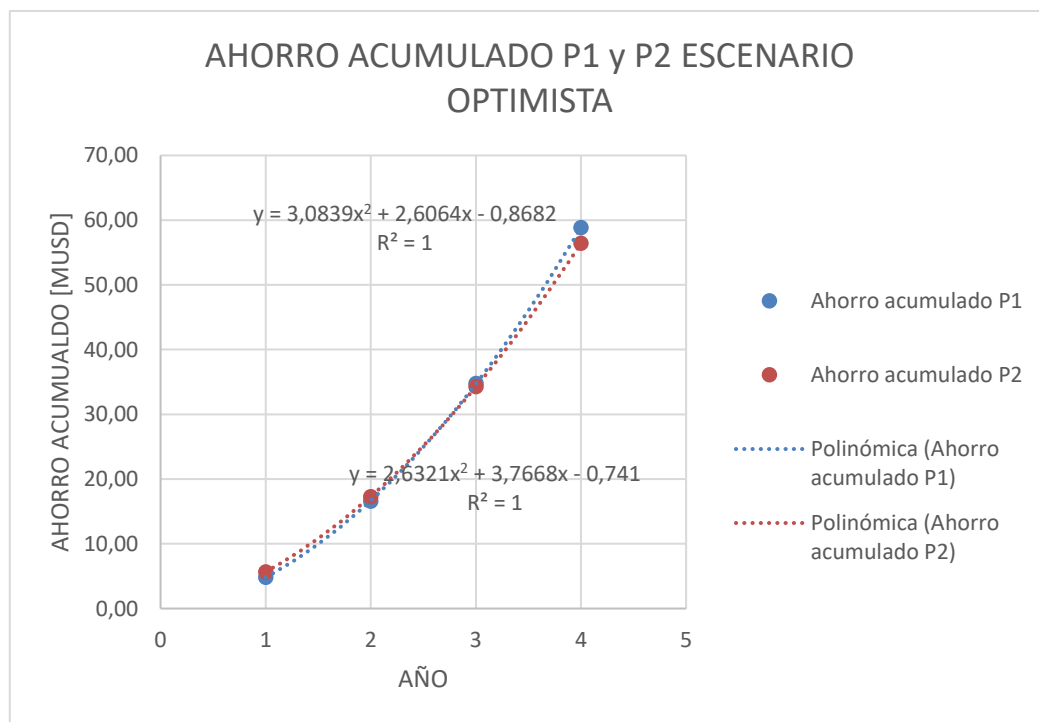


Figura 53. Gráfico de ahorro acumulado del sistema propuesto 1 en escenario optimista. Elaboración propia

Con las líneas de tendencias que se muestran en la Figura 54, se iguala cada función al valor de su costo de inversión según el sistema propuesto que corresponde, para así

obtener el tiempo de payback. En el escenario pesimista, el ahorro acumulado llega al mismo valor que la inversión inicial a los 0,32 años para el Sistema Propuesto y a los 0,28 años para el Sistema Propuesto 2.

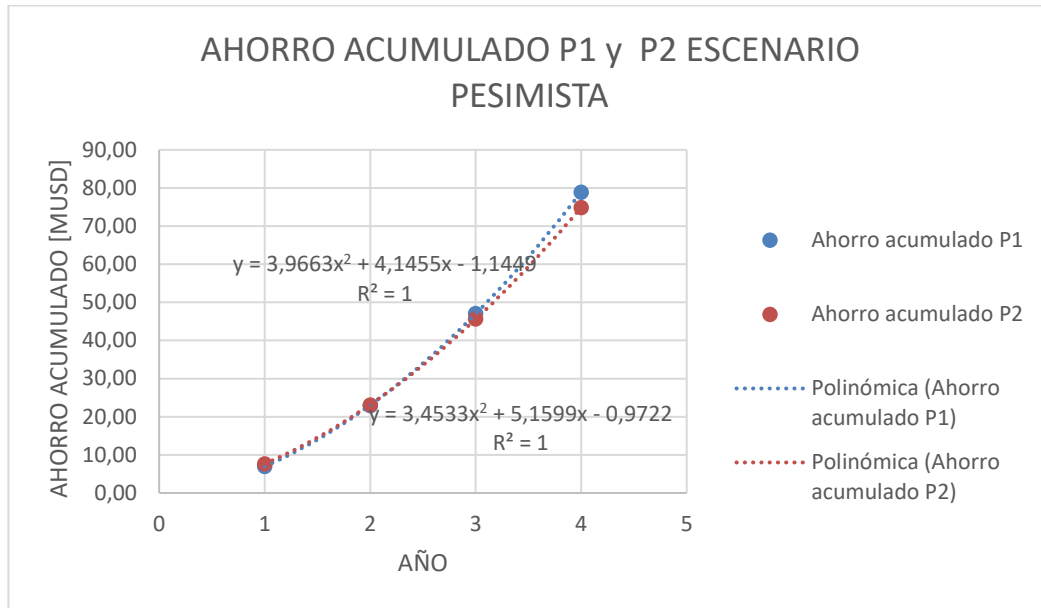


Figura 54. Gráfico de ahorro acumulado del sistema propuesto 1 y sistema propuesto 2 en escenario pesimista. Elaboración propia.

En la Tabla 11 se muestra un resumen con los valores de paybacks obtenidos en cada sistema y en cada escenario.

Tabla 11.

Tabla resumen de paybacks obtenidos.

	Inversión inicial [MUSD]	Payback escenario optimista [año]	Payback escenario pesimista [año]
Sistema Propuesto 1	2,65	0,73	0,32
Sistema Propuesto 2	0,72	0,59	0.28

Nota. Elaboración propia.

Tanto para el escenario optimista como pesimista, el payback del Sistema Propuesto 2 se presenta antes. En el primer escenario se presenta 0,14 años antes que el Sistema Propuesto 1, mientras que en el segundo escenario se presenta 0,04 años antes que ese mismo sistema.

Que el Sistema Propuesto 2 en ambos escenarios presentes su payback antes se debe principalmente a dos factores. Primero, que la inversión inicial del Sistema Propuesto 2, que es la misma en ambos escenarios (Tabla 6 y 7), es un 72,81% menor con respecto a la del Sistema Propuesto 1. Por otro lado, hasta el año 2, el ahorro acumulado del Sistema Propuesto 2 es mayor tanto en el escenario optimista como pesimista con respecto al Sistema Propuesto 1 (Tabla 10), donde se calcula que es un 3,92% mayor su ahorro acumulado en el escenario optimista y un 0,69% mayor en su ahorro acumulado en el escenario pesimista con respecto al Sistema Propuesto 1 en el año 2.

Que la inversión inicial del Sistema Propuesto 2 sea menor y que, independiente del escenario, el ahorro acumulado sea mayor hasta el año 2 en comparación con el Sistema Propuesto 1, hace que el Sistema Propuesto 2 alcance más rápido el momento en que el ahorro acumulado coincida con la inversión inicial.

A partir del análisis económico realizado, se establecen dos recomendaciones principales para apoyar la selección del sistema propuesto:

- Considerar el tiempo real en que se ejecuta el proyecto: Aunque se evalúa utilizar un horizonte de cuatro años y al final de este periodo el Sistema Propuesto 1 presenta menores valores de LCC y mayores ahorros de costos (independiente del escenario), esta tendencia comienza a manifestarse entre el año 1 y 2. Por lo tanto, definir el horizonte temporal efectivo de operación debe ser un criterio central en la decisión, ya que la conveniencia económica cambia antes y después de dicho intervalo.
- Evaluar el tiempo de retorno de inversión (payback) en conjunto con el comportamiento del ahorro acumulado a largo plazo: En ambos escenarios, se da la situación de que el Sistema Propuesto 2 muestra un payback más corto, lo cual es relevante cuando se busca recuperar la inversión inicial en el menor

tiempo posible. Sin embargo, este indicador no captura la evolución económica del sistema en el periodo completo. Tanto en el escenario optimista como pesimista, a partir del tercer año, el Sistema Propuesto 1 presenta mayores ahorros acumulados, lo que demuestra que la alternativa con retorno más rápido no necesariamente es la más conveniente en todo el horizonte evaluado. Por ello, el payback queda sujeto al criterio del responsable de la selección del sistema, en caso de que priorice la recuperación temprana de la inversión. Sin embargo, se recomienda considerar que un retorno más rápido no implica necesariamente el mayor ahorro acumulado al final del periodo evaluado.

5. Acciones de mantenimiento recomendadas

En este capítulo se presentan las acciones de mantenimiento recomendadas para el sistema de bombeo de gasoil actual y los sistemas propuestos, formuladas a partir del diagnóstico obtenido mediante el análisis del historial de vida de los equipos y de los resultados de las simulaciones realizadas. El propósito de este capítulo es proponer acciones que permitan fortalecer la gestión de mantenimiento para incrementar su desempeño operativo reflejado en los parámetros RAM.

Como primer aspecto, se identifica la necesidad de mejorar la calidad de los datos del sistema de bombeo de gasoil actual, ya que se detectaron grados de incumplimiento en los registros de datos que obligaron a realizar las suposiciones en los análisis. Esta deficiencia afecta la precisión de los resultados, por lo que se proponen acciones orientadas a fortalecer el registro de la información operacional y de mantenimiento en el sistema de bombeo de gasoil actual.

Posteriormente, se aplica el árbol lógico del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) con el objetivo de definir acciones adecuadas para el sistema de bombeo de gasoil actual. Previo a su aplicación, se realiza una priorización de los modos de falla identificados, considerando tres fuentes complementarias de información: la opinión del personal técnico de mantenimiento, el análisis del historial

de vida recopilado y los resultados obtenidos de la simulación del sistema de bombeo de gasoil actual. Este enfoque integrado permite sustentar las decisiones de mantenimiento tanto en la experiencia práctica como en la evidencia cuantitativa.

5.1 Acciones recomendadas para mejorar la calidad de los datos en el sistema de bombeo de gasoil

La calidad de los datos constituye un elemento fundamental para tener una correcta evaluación de la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Un sistema con registros coherentes y completos permite comprender el comportamiento real de los equipos, identificar los modos de falla más críticos y establecer estrategias de mantenimiento, reduciendo la probabilidad de detenciones no planificadas.

Por el contrario, la falta de calidad en los datos manifestada en registros incompletos introduce incertidumbre en los resultados de los análisis y limita la capacidad de realizar diagnósticos correctos. Esta deficiencia obliga a incorporar suposiciones o consideraciones que, si bien permiten avanzar en los estudios, pueden alejar los resultados del comportamiento real del sistema.

En el contexto del sistema de bombeo de gasoil, disponer de datos de buena calidad es especialmente relevante, ya que los registros sirven como base para modelar el desempeño operativo y simular el comportamiento futuro del sistema bajo distintas configuraciones. Por lo tanto, fortalecer los procesos de recolección y almacenamiento de datos operativos y de mantenimiento se vuelve una condición indispensable para garantizar evaluaciones más certeras y, en consecuencia, una toma de decisiones más precisa y sustentada técnicamente.

A continuación, se describen acciones recomendadas para mejorar la calidad de los datos tanto para el sistema de bombeo actual, como de sistemas propuestos en caso de ser implementados:

- 1) Implementar de manera integral la norma ISO 14224:

Se recomienda estudiar y aplicar de forma completa la norma 14224, en cuanto a procedimientos de recopilación, clasificación y análisis de datos. La empresa actualmente utiliza la norma únicamente para la identificación jerárquica de los equipos, sin seguir sus lineamientos para el desarrollo de estudios RAM. Comprender y adoptar plenamente la ISO 14224 permite definir qué información se debe registrar, facilitando la ejecución de futuros proyectos de análisis a mayor escala.

2) Consolidar una base de datos única y robusta:

Durante el desarrollo del presente estudio se hizo una integración de información proveniente de diversas fuentes para crear una base de datos propia, siendo un proceso extenso de unificación de registros. Se recomienda crear una base de datos centralizada y estructurada que contenga todos los antecedentes operativos y de mantenimiento relevante para futuros estudios. Una plataforma unificada permite disponer de datos fácilmente accesibles para futuras evaluaciones.

3) Incorporar registros específicos para la bomba J-700SPARE y J-700N:

En el estudio se identifica la ausencia de registros explícitos asociados al tag J-700SPARE, lo que obliga a realizar suposiciones sobre su comportamiento operativo y sus detenciones. Esto se debe a que, tanto la bomba J-700S como la J-700SPARE comparten el mismo código de identificación en su placa, diferenciándose solo por una letra grabada en la carcasa. Se recomienda normalizar la identificación de los equipos en sus placas y registrar individualmente la información de operación y mantenimiento de la J-700SPARE, asegurando la trazabilidad y precisión de los datos asociados a cada componente.

Se hace la misma recomendación para la J-700N, es decir, asegurarse de que tenga su registro propio.

4) Clasificar adecuadamente los tipos de mantenimiento:

Actualmente, las actividades de mantenimiento se clasifican en función de su nivel de urgencia, sin distinguir claramente entre mantenimientos correctivos,

preventivos o planificados. Esto genera confusión entre las áreas operativas y de mantenimiento, dificultando los análisis posteriores. Se recomienda adoptar la categorización establecida por la norma ISO 14224, que diferencia los tipos de mantenimiento según su naturaleza y propósito. Esta mejora permite una caracterización más precisa de las intervenciones, facilitando la evaluación de desempeño y la toma de decisiones basadas en datos confiables.

5.2 Aplicación del árbol lógico de decisión del RCM

Con el propósito de definir las acciones de mantenimiento más adecuadas para el sistema de bombeo de gasoil actual y los sistemas propuestos, se aplica el árbol lógico de decisión del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Esta herramienta permite determinar estrategias de mantenimiento a partir de la evaluación de los modos de falla identificados.

Como paso previo a la aplicación del árbol de decisión, se realiza una priorización de los modos de falla, con el objetivo de enfocar las acciones de mantenimiento en aquel modo de falla que presenta mayor criticidad. Para ello se consideran tres perspectivas: Criterio del personal técnico de mantenimiento, resultados del historial de vida de los equipos y los resultados obtenidos en la simulación.

5.2.1 Identificación del modo de falla más crítico

Para identificar el modo de falla que presenta mayor criticidad, se recurren a tres perspectivas: Criterio del personal técnico de mantenimiento, resultados del historial de vida de los equipos y los resultados obtenidos en la simulación.

- Criterio del personal técnico del mantenimiento:

De acuerdo con la experiencia operativa acumulada, los técnicos de mantenimiento coinciden en identificar la fuga de sello mecánico como el modo de falla más recurrente y relevante dentro del sistema de bombeo de gasoil actual. Según el personal técnico de mantenimiento, este modo de falla se

presenta con frecuencia significativa durante la operación, afectando directamente la continuidad del servicio. Además, ellos lo consideran como crítico también por su impacto en la seguridad operativa, dado que las fugas de gasoil pueden generar condiciones de riesgo ambiental o de inflamabilidad. Por ello, la mitigación de este modo de falla constituye una prioridad dentro de la estrategia de mantenimiento dentro del sistema de bombeo de gasoil actual.

- Resultados del historial de vida de los equipos:

Esta evaluación que se hace es mediante los gráficos Jack-knife (Figuras 36 y 38). En ambos equipos el modo de falla “Fuga por sello” es categorizada como Agudo-crónico. Esto sugiere que hay que concentrar los esfuerzos de mantenimiento en el sello mecánico de las bombas por el modo de falla por fuga de fluido, debido a la tasa de fallas y tiempo medio de reparación que presenta, generando indisponibilidad en el sistema estudiado. Hay que tener en cuenta que los resultados del historial de vida fueron en base a suposiciones y consideraciones definidas previamente al realizar el estudio de los registros históricos del sistema de bombeo de gasoil actual, por lo tanto, los resultados corresponden a estimaciones y no una exactitud de la realidad.

- Resultados obtenidos en la simulación RAM:

El software de la simulación entrega el resultado de los METBF de cada uno de los modos de falla. Por lo tanto, para obtener el MTBF se ocupa la fórmula (1), ya que dentro de las consideraciones y suposiciones de la simulación está que el tiempo de las detenciones corresponde a los tiempos medios de reparación (MTTR). Además, al tratarse de un ítem reparable el MTTF de la fórmula (1) termina siendo un MTBF.

Teniendo en cuenta que cada modo de falla, en este caso, corresponde a un parte o ítem de los equipos, se aproxima la confiabilidad de estos durante el intervalo simulado.

La Tabla 12 muestra los MTBF, METBF y MTTR de los componentes del sistema de bombeo de gasoil actual al cuarto año evaluado durante la simulación.

Tabla 12.

Tiempos medios de componentes en sistema de bombeo de gasoil actual al cuarto año de evaluado.

Sistema actual			
Componente	MTBF[h]	METBF [h]	MTTR [h]
Sello J700	14983,0	16515,0	1532,0
Descanso J700	53237,0	53240,0	3,0
Motor J700	169398,0	169400,0	2,0
Flange J700	12146,6	12330,0	183,4
Eje Caja-Bomba J700	12141,2	12420,0	278,8
Sello J700S	2605,6	2798,0	192,4
Tanque de aceite J700S	115690,0	115800,0	110,0

Nota. Elaboración propia.

Según los resultados que presenta la Tabla 12, el sello de la J-700S presenta un MTBF de 2605,6 horas, siendo el menor de los MTBF de los componentes que. Llega a ser 78,5% menor su MTBF con respecto al motor y al eje de la J-700, que son los componentes que tienen menor MTBF. Utilizando la fórmula (2) como referencia para tener una comparativa del parámetro de confiabilidad entre los componentes del sistema de bombeo de gasoil actual, se grafican las curvas de este parámetro en la Figura 55.

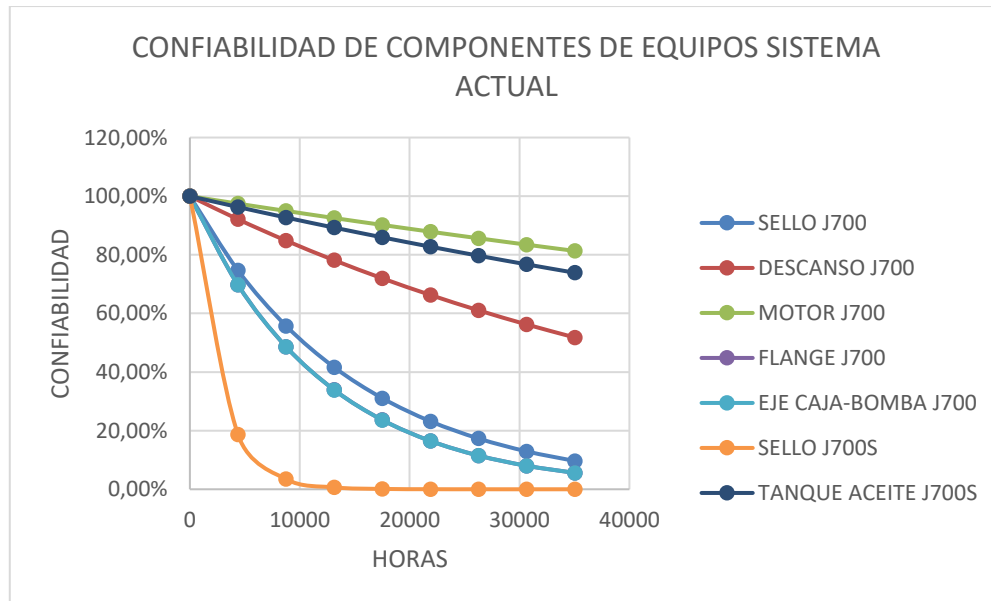


Figura 55. Gráfico de confiabilidad en componentes del sistema de bombeo de gasoil actual.

Elaboración propia.

Como muestra la Figura 55 el componente con menor probabilidad de cumplir su función durante todo el tiempo de evaluación corresponde al del sello mecánico en la J-700S para el sistema actual, donde a partir de los dos años y medio (21900 horas) presenta prácticamente una probabilidad de cumplir su función del 0,0%. En la Figura 55 se observa que, el componente con la segunda menor probabilidad de cumplir su función durante todo el periodo de evaluación es el eje, el cual a las 35040 hora presenta solo una probabilidad de 5,6% cumplir su función durante la totalidad del intervalo analizado

La Tabla 13 muestra el MTBF, METBF y MTTR de los componentes del Sistema Propuesto 1 al cuarto año evaluado durante la simulación.

Tabla 13.

Tiempos medios de componentes en Sistema Propuesto 1 al cuarto año de evaluado.

Sistema Propuesto 1			
Componentes	MTBF [h]	METBF [h]	MTTR [h]
Sello J700N	34501,4	34680,0	178,6
Sello J700	18087,0	18240,0	153,0
Descanso J700	7299997,0	7300000,0	3,0
Motor J700	2024998,0	2025000,0	2,0
Flange J700	2737816,3	2738000,0	183,7
Eje Caja-Bomba J700	175199720,0	175200000,0	280,0
Sello J700s	301907,9	302100,0	192,1
Tanque Aceite J700s	2654889,9	2655000,0	110,1

Nota. Elaboración propia.

Según los valores que muestra la Tabla 13, nuevamente el que tiene menor MTBF es un sello, en este caso el de la J-700 con 18087,0 [h]. Su MTBF es 47,6% menor con respecto al del Sello de la J-700N, que es el segundo componente con menor MTBF.

La Figura 56 muestra la gráfica de las curvas de confiabilidad para el Sistema Propuesto 1.

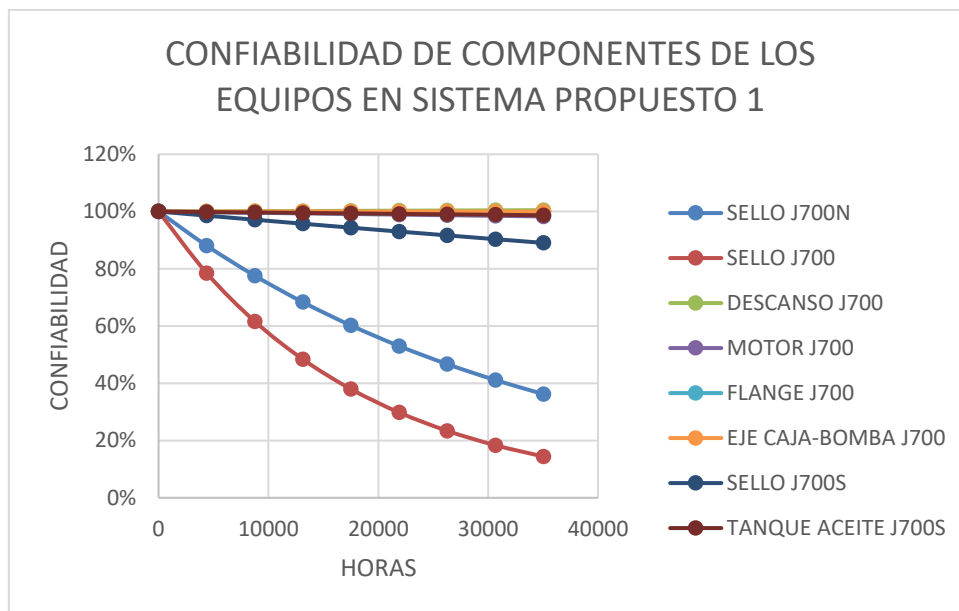


Figura 56. Gráfico de confiabilidad en componentes del sistema propuesto 1. Elaboración propia.

En el sistema propuesto 1, como lo muestra la Figura 56, los que tienen menor probabilidad de cumplir la función en el periodo de estudio son los sellos de J-700 y J-700N. Hasta las 35040 horas, con la estimación de la Figura 56, el sello de la J-700N presenta una probabilidad de cumplir su función que es 21,8 puntos porcentuales superior a la del Sello J-700.

Los demás componentes presentan valores de MTBF cuya magnitud, al ser ingresados en la aproximación utilizada para generar la gráfica de la Figura 56, hacen que las superponga.

La Tabla 14 muestran el MTBF, METBF y MTTR de los componentes del Sistema de Propuesto 2 que son resultado al cuarto año evaluado durante la simulación.

Tabla 14.

Tiempos medios de componentes en Sistema Propuesto 2 al cuarto año de evaluado.

Sistema Propuesto 2			
Componentes	MTBF [h]	METBF [h]	MTTR [h]
Sello J700	16026,8	16180	153,2
Descanso J700	48917	48920	3,0
Motor J700	172998	173000	2,0
Flange J700	11186,7	11370	183,3
Eje Caja-Bomba J700	11141,3	11420	278,7
Sello J700S	2483,5	2676	192,5
Sistema Lubricación J700S	113290	113400	110
Sello J700SPARE	18627,5	18820	192,5
Tanque Aceite J700SPARE	373089,9	373200	110,1

Nota. Elaboración propia.

Según los valores mostrados en la Tabla 14, para el Sistema Propuesto 2, el que tiene menor MTBF es el Sello del equipo J-700. De hecho, su MTBF es 77,7% menor con respecto al del Eje de J-700, el segundo componente que tiene menor valor de este parámetro.

La Figura 57 muestra la gráfica de las curvas de confiabilidad para el Sistema Propuesto 2.

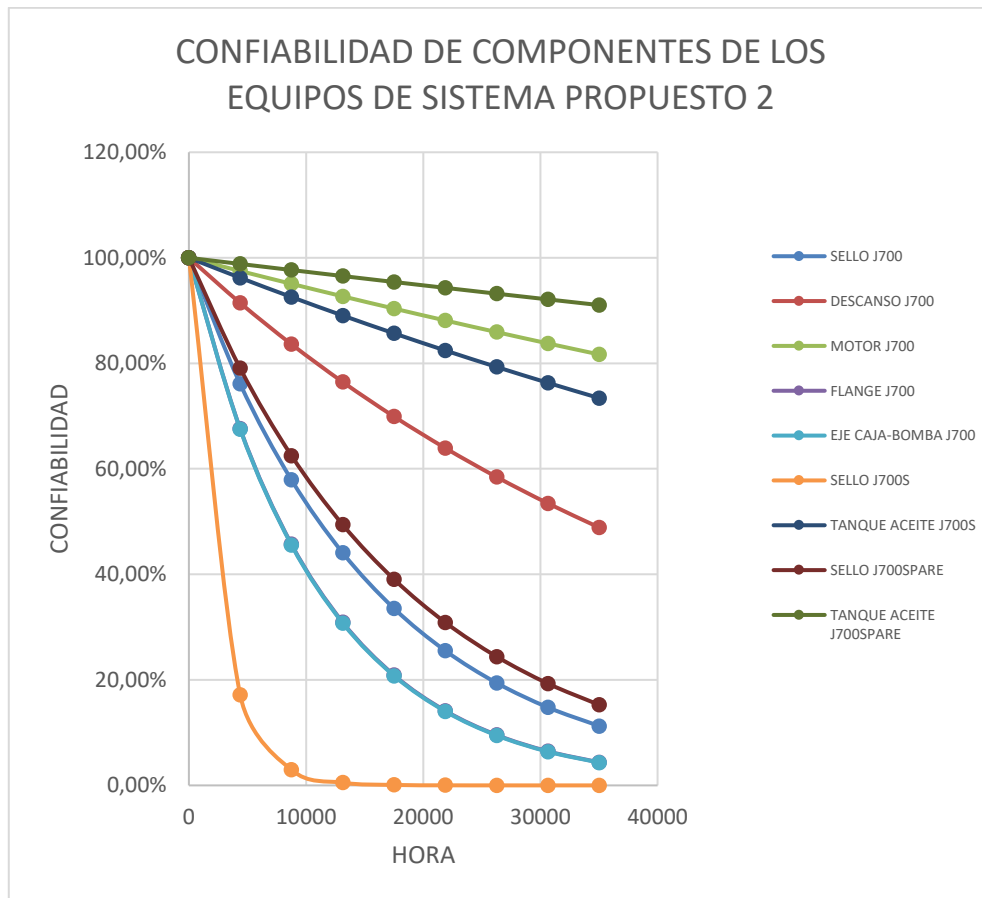


Figura 57. Gráfico de confiabilidad en componentes del sistema propuesto 2. Elaboración propia.

Según la Figura 57, el sello de J-700S tiene la probabilidad de 0% de cumplir su función hasta las 35040 horas. Este sello tiene una probabilidad de 4,31 puntos porcentuales menor de probabilidad de cumplir su función a los cuatro años de evaluación en comparación con el Eje de la J-700.

A partir de los tres criterios aplicados para la selección del modo de falla críticos, se establece que la fuga de sello mecánico es el modo que se prioriza en este estudio. En primer lugar, el criterio del personal técnico de mantenimiento indica que las fallas internas del sistema se originan principalmente en los sellos mecánicos, lo que evidencia su relevancia operativa. En segundo lugar, el análisis del historial de vida de los equipos, mediante gráfico Jack-knife, muestra que el modo de falla que es agudo crónico es la fuga de sello mecánico. Finalmente, los resultados obtenidos en la

simulación RAM señalan que los sellos mecánicos presentan la menor probabilidad de mantener su función dentro del intervalo adecuado en comparación con los demás componentes analizados.

Si bien la clasificación de este modo de falla puede parecer evidente desde la experiencia operativa, la aplicación de múltiples criterios permite sustentar la decisión de manera rigurosa y verificable. La convergencia el juicio experto, la evidencia histórica y el modelamiento probabilístico asegura la consistencia del resultado y confirma que la fuga de sello mecánico constituye el modo de falla más crítico y, por ello, se prioriza en la definición de las estrategias de mantenimiento.

5.2.2 Acciones de mantenimiento recomendadas en base al árbol lógico de decisión del RCM

Para definir las acciones de mantenimiento que son recomendadas para el sistema de bombeo de gasoil actual y los sistemas propuestos, se aplica el árbol lógico de decisiones del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

En el caso de este estudio, se enfoca la aplicación del árbol en el modo de falla más crítico de los sistemas estudiados, con el fin de definir medidas específicas que permitan mitigar su recurrencia y su impacto sobre la operación.

Las preguntas que se responden son las presentes en la Figura 21. De todas maneras, se redactan antes de ser respondidas. Las respuestas a las preguntas del árbol lógico del RCM y las acciones de mantenimiento recomendadas se hacen con apoyo de los técnicos de mantenimiento.

1. ¿La pérdida de la función causada por el modo de falla se hará evidente para el equipo de operación en circunstancias normales?

Si. Generalmente, la fuga de gasoil es visible al gotear.

2. ¿Existe un riesgo intolerable de que los efectos de este modo de falla puedan herir o matar a alguien?

Si. El gasoil al ser un combustible presenta riesgo de inflamabilidad. Un eventual incendio podría causar lesiones graves o la muerte. Además, los derrames de gasoil pueden provocar caídas de las personas que transitan por ahí. Por otra parte, la inhalación de este combustible a largo plazo puede tener efectos dañinos en la salud.

8. ¿Es una tarea programada basada en condición técnicamente factible y vale la pena hacerla?

Si. La fuga de gasoil es precedida por una condición detectable como, por ejemplo, un aumento gradual de la vibración, la temperatura del sello o una fuga pequeña que puede ser monitoreada.

Según las respuestas en el recorrido por el árbol lógico del RCM, las acciones de mantenimiento recomendadas son tareas basadas en condición.

En base a este caso, que corresponde al modo de falla de fuga de gasoil del sello mecánico, las acciones recomendadas son:

- Monitoreo de vibración: Debido a que cuando un sello mecánico comienza a fallar puede generar mayor fricción entre sus caras o desalineación debido al desgaste, se recomienda implementar un programa de monitoreo de vibración periódico en la carcasa de la bomba o eje, estableciendo límites de alarma para la vibración para que se entregue una orden de trabajo al respecto para inspección del sello.
- Monitoreo de temperatura: Debido a que la fricción entre las caras de los sellos genera calor, hacen que la temperatura sea un indicador de fallo potencia. Se recomienda la instalación de un sensor de temperatura en la carcasa del sello, estableciendo un límite para que se genere una orden trabajo al respecto para la inspección del sello.
- Inspección de fugas: Inspecciones regulares del sello mecánico en busca de signo tempranos de goteo de gasoil. Cualquier signo de fuga debe activar una orden de trabajo al respecto para inspeccionar a detalle el sello.

CONCLUSIONES

El presente trabajo cumple su objetivo general de rediseñar el sistema de bombeo de combustible en el proceso Hidro-Cracking, al proponer dos alternativas de configuración que incrementan los parámetros RAM respecto al sistema actual. Se demuestra que, en concordancia con los principios de confiabilidad, la implementación de configuraciones en redundancia stand-by es una solución que resulta financieramente ventajosa al generar ahorros cuantificables y un retorno de la inversión (payback) dentro del periodo de evaluación del proyecto.

En relación con la caracterización del sistema de bombeo de combustible en proceso Hidrocracking actual se revela la deficiencia sistemática en la calidad del registro de datos, manifestada en el incumplimiento de los lineamientos establecidos por la norma ISO14224:2016. En este contexto, destaca la categoría de Datos de Mantenimiento, donde los subsistemas J-700 y J-700S presentan un cumplimiento de registro solo del 25% y 27% respectivamente. Dichas limitaciones generan incertidumbre sobre los datos históricos, obligando a recurrir a suposiciones que, a su vez, incrementan la incertidumbre en los resultados de la simulación RAM. Esto establece la necesidad de implementar acciones para mejorar la calidad de los registros.

Con respecto al modelamiento de Diagramas de Bloques de confiabilidad y a la simulación a cuatro años, los resultados sugieren que ambas configuraciones propuestas presentan un desempeño superior al sistema actual en términos de los indicadores RAM, considerando que las suposiciones y consideraciones adoptadas en el modelo influyen directamente en los resultados obtenidos y que estos no representen con certeza absoluta el comportamiento real futuro del sistema del sistema, debido a la incertidumbre asociada al proceso de simulación. La comparación con el sistema actual revela que, al horizonte de cuatro años, el Sistema Propuesto 1 es mayor al sistema actual en 70,91, 11,54 y 20,91 puntos porcentuales en confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, respectivamente. Por su parte, el Sistema Propuesto 2 es mayor al sistema actual en 5,9, 10,67 y 22,3 puntos porcentuales en los mismos indicadores. Analizando estas diferencias de puntos porcentuales, destaca el Sistema Propuesto 1

debido a la garantía que señala el fabricante para la nueva bomba instalada. Por otro lado, el Sistema Propuesto 2 ofrece mejoras, pero el hecho de que todos sus subsistemas involucrados presenten desgaste debido a su previo uso hace que la probabilidad de incumplir su función sea mayor.

La evaluación económica mediante LCC revela que el Sistema Propuesto 1, a pesar de la mayor inversión inicial, finaliza el periodo simulado con los costos totales (LCC) más bajos. Por otro lado, el Sistema Propuesto 2 propone un retorno de la inversión (payback) más acelerado debido a su menor costo de implementación. Cabe destacar que estos resultados se obtienen a partir de consideraciones y suposiciones, por lo tanto, bajo dicho contexto, deben interpretarse reconociendo la incertidumbre asociada al proceso y sin representar con certeza absoluta el comportamiento económico real futuro. En consecuencia, la elección entre ambas alternativas se define por la prioridad de inversión de la empresa: El Sistema Propuesto 1 es superior si el objetivo es la minimización del costo de ciclo de vida a largo plazo, y el Sistema Propuesto 2 si la prioridad radica en la recuperación temprana de capital (payback).

Finalmente, se logra formular las recomendaciones finales, las cuales se enfocan en dos pilares específicos. Primero, se establece como acción fundamental y prioritaria la implementación de medidas para la mejora de la calidad de datos, alineadas estrictamente con la norma ISO 14224:2016. Segundo, se recomienda la aplicación de tareas de mantenimiento basado en condiciones, dirigidas específicamente al modo de falla de “fuga de sello mecánico”, priorizado mediante la opinión de personal técnico, los datos recopilados del historial de vida y los resultados de la simulación RAM. La implementación rigurosa de las tareas recomendadas pretende mitigar la incertidumbre generada por la data deficiente y asegurar la sostenibilidad a largo plazo del desempeño RAM alcanzado por las configuraciones propuestas en caso de ser instaladas.

Es importante destacar que los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas en este trabajo se encuentran relacionadas a consideraciones y suposiciones adoptadas y detalladas durante la elaboración de la modelación. En este sentido, si bien los resultados permiten realizar comparaciones relativas entre las configuraciones

evaluadas, estos no representan con certeza absoluta el comportamiento real futuro del sistema, debido a la incertidumbre a la que va relacionada el proceso de simulación.

BIBLIOGRAFÍA

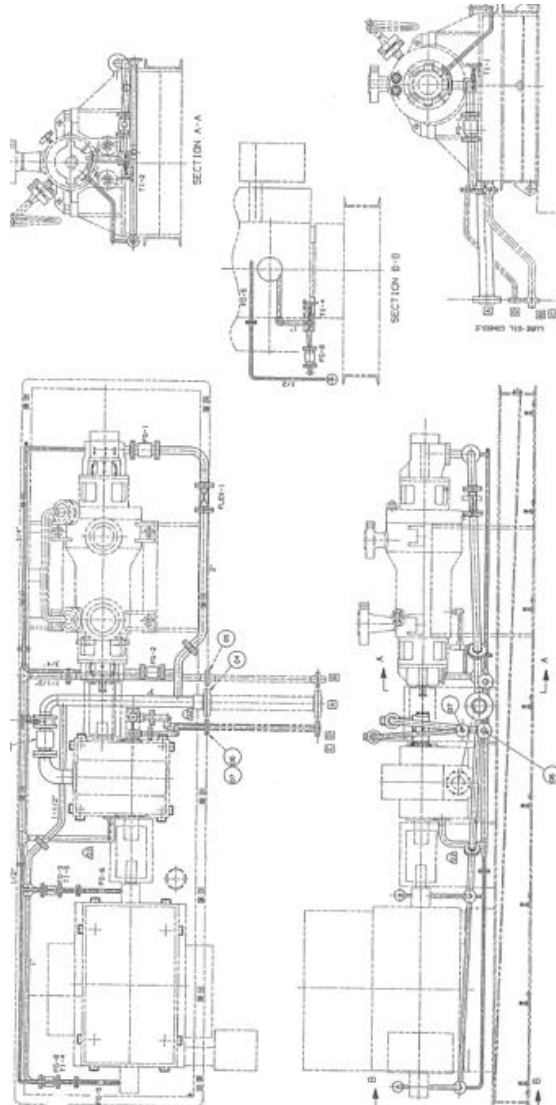
- ABB. (2023). *Value of reliability: ABB Survey Report 2023*. Retrieved from <https://campaign-mo.abb.com/1/961052/2025-03-21/6rmh7>
- Allauca Caisaguano, L. E., & Cullay Ashqui, E. A. (2017). *Pronóstico de la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad, mediante la norma iso 3997-9 para optimizar la operación y mantenimiento del ascensor de la facultad de mecánica*. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6499>
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*.
- Buitrago Cuellar, F. J. (2018). *Modelo de confiabilidad de metodología (RAM) para un sistema de bombeo de agua en inyección*. Retrieved from https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3056/1/TGT_1676.pdf
- Corvaro, F., Giacchetta, G., Marchetti, B., & Renacati, M. (2017). Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API618. *KeAI*, 266-272. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656116301523>
- Ebeling, C. E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Retrieved from https://www.academia.edu/125728124/An_introduction_to_reliability_and_maintainability_engineering
- ENAP. (s.f). *Reporte integrado 2023*. Retrieved from <https://www.enap.cl/memorias?year=2023>
- ISO. (2016). *ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/64076.html>

- ISO. (2021). *ISO 15663:2021 Petroleum, petrochemical and natural gas industries- Life cycle costing*. Retrieved from <https://pdfcoffee.com/iso-15663-2021-life-cycle-costing-pdf-free.html>
- Jara Leal, H., & Villanueva Cruz, V. (2005). *Manual de Operación Planta de HCK*.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centred Maintenance (RCM) II*.
- OREDA Participants. (2002). *OREDA: Offshore Reliability Data Handbook* (4 ed.).
- Orozco Hernandez, G., Olaya Flórez, J. J., & Restrepo Parra, E. (2014). Fundamentos de simulación de materiales por medio del método de Monte Carlo. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 11, 100-110. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6684759.pdf>
- Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*.
- Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento: Ingeniería, Gestión y Organización*. Retrieved from <https://pdfcoffee.com/pistarelli-manual-de-mantenimiento-4-pdf-free.html>
- Rausand, M., Barros, A., & Hoyland, A. (2021). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications* (3 ed.). Wiley. Retrieved from https://books.google.cl/books?id=DSJgvgAACAAJ&pg=PA66&hl=es&source=gbv_selected_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false
- SAE. (2002). *SAE JA1012 A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standards*. Retrieved from https://www.academia.edu/49240969/SAE_JA_1012
- Singh Shraddha, R., Chaturvedi, A., Lal Dori, R., Lodhi S, K., Singh, A., & Gola, N. (2013). Hydro cracking for maximizing middle distillates. *International Journal Of Scientific Research and Reviews*, 27-35. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/281080791_Hydro_cracking_for_Maximizing_Middle_Distillates

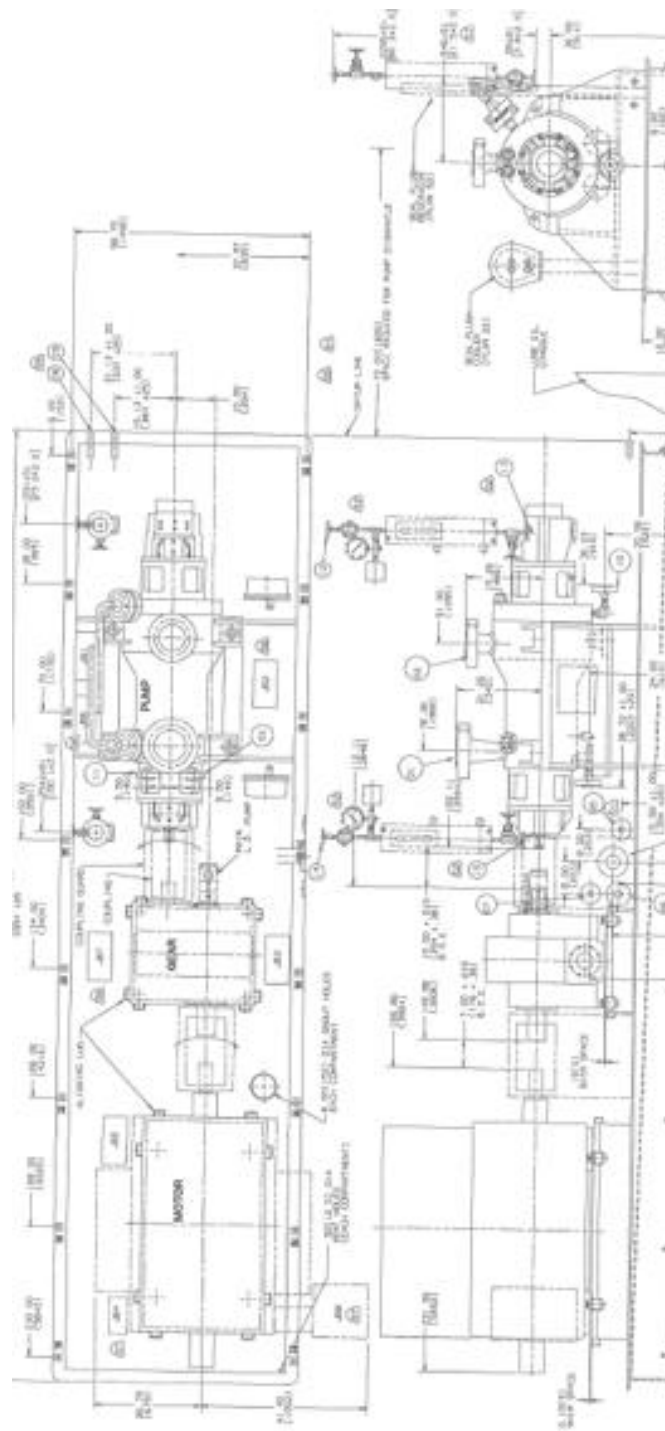
- Singh, C., & Mitra, J. (1995). Monte Carlo simulation for reliability analysis of emergency and standby power systems. *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, (pp. 2290-2295). Orlando, FL, USA. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/530594>
- Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing-theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335-44. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263786396000890>

ANEXOS

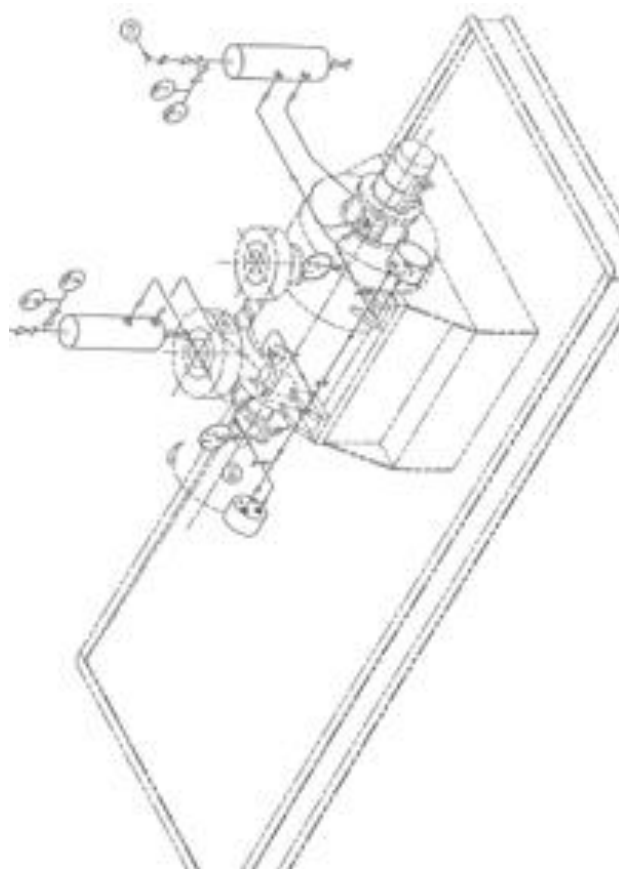
Anexos 1: Planos de bomba J-700/S



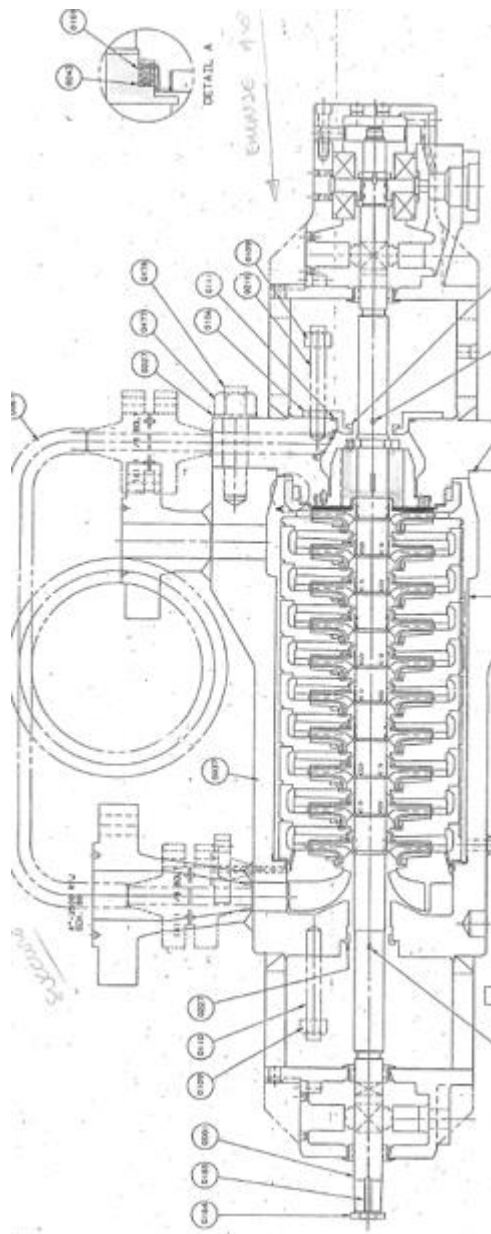
Anexos 1.1. Plano de sistema de lubricación de bomba J700/S.



Anexos 1.2. Plano de sistema motor-caja-bomba.



Anexos 1.3. Plano de plan API de bomba J700/S.



Anexos 1.4. Plano de bomba J700/S.

Anexos 2: Recomendaciones de mantenimiento del fabricante

Anexos 2.1

Recomendaciones de fabricante ante problemas.

<u>Problemas</u>	<u>Causas</u>
No entrega líquido	• Rotación incorrecta. • La bomba no está cebada. • La línea de succión no está llena con líquido. • Bolsa de aire o vapor en la línea de succión. • La tubería de succión no está sumergida lo suficiente. • La NPSH disponible no es suficiente. • La bomba no ha alcanzado la velocidad nominal
No entrega a la capacidad nominal	• Rotación incorrecta. • La bomba no está cebada. • La línea de succión no está llena con líquido. • Bolsa de aire o vapor en la línea de succión. • El extremo de la línea de succión no está sumergido lo suficiente. • La NPSH disponible no es suficiente.

	• La bomba no ha alcanzado la velocidad nominal. • La carga del sistema es demasiado alta. • Los anillos de desgaste están gastados. • Impulsor dañado. • Fuga interna debida a superficies de sellado defectuosas.
No desarrolla la presión de descarga nominal	• Hay aire o vapor en el líquido. • La bomba no ha alcanzado la velocidad nominal. • Rotación incorrecta. • Los anillos de desgaste están gastados. • Impulsor dañado. • Fuga interna debida a superficies de sellado defectuosas. • La NPSH disponible no es suficiente.
Pérdida de flujo después de comenzar	• La línea de succión no está llena con líquido. • Fugas de aire en la línea de succión o en la carcasa para sello. • Hay aire o vapor en el líquido. • Bolsas de aire o vapor en la línea de succión.

	• El extremo de la línea de succión no está sumergido suficiente. • Las NOSH disponible no es suficiente.
Consumo excesivo de energía	• La velocidad es demasiado alta. • La carga del sistema es demasiado baja. • El peso específico del líquido es demasiado alto. • El elemento rotativo se está arrastrando. • Empaque demasiado apretado.
Carcasa para sellos o estopera recalentada	• Empaque demasiado apretado • Empaque o sello no lubricado • Grado de empaque incorrecto • No hay suficiente agua de enfriamiento. • Empaque insuficiente de la estopera.
Cojinetes recalentados	• Presión de aceite lubricante demasiado baja. • Aceite lubricante de grado incorrecto o de mala calidad. • Polvo en los cojinetes o en el aceite lubricante. • Humedad en el aceite lubricante. • Enfriador de aceite lubricante obstruido o con incrustaciones.

	• Falla en el sistema de aceite lubricante. • Circulación insuficiente de agua de enfriamiento a través del enfriador de aceite lubricante. • Espaciamiento del cojinete demasiado estrecho. • Desalineación. • Vibración excesiva.
Los cojinetes se gastan rápidamente	• Desalineación. • Eje doblado. • Vibración. • Empuje excesivo debido a falla mecánica o desgaste dentro de la bomba. • Falta de lubricación. • Cojinetes instalados incorrectamente.
Los cojinetes se gastan rápidamente	• Polvo en los cojinetes. • Humedad en el aceite lubricante. • Enfriamiento excesivo o inadecuado de los cojinetes

Nota. Elaborado por fabricante.

Anexos 2.2

Recomendaciones de fabricante ante problemas.

Causa de vibración	Corrección
Líquido insuficiente en el impulsor de admisión debido a nivel bajo de líquido	Usando la válvula de descarga, reducir la capacidad hasta restaurar el nivel de líquido.
Líquido insuficiente en el impulsor de admisión debido a la presencia de aire o vapores en la admisión.	Ventear la bomba para restablecer la capacidad completa. Luego, si el problema continúa, inspeccionar para ver si hay bolsas de vapor en la línea de succión. Verificar la NPSH disponible y asegurarse de que el extremo de la línea de succión esté completamente sumergido en líquido en el recipiente. Si el extremo no está completamente sumergido, se introduce vapor a la línea de succión. Corregir la condición en la línea de succión, como sea requerido.
Desalineación (vibración constante)	Verificar la alineación de la bomba y unidad de impulsión y corregirla, como sea requerido. Luego, inspeccionar la línea de succión y de descarga para asegurarse que esté correctamente apoyadas y que se hayan tomado las medidas adecuadas para la expansión. Si la desalineación es frecuente, realizar una inspección minuciosa. Corregir la

	instalación de la línea, como sea requerido.
Pernos de cimientos flojos	Apretar los pernos, verificar el nivel y la alineación y corregir cuando sea necesario.
Pernos de sujeción de la bomba o de la unidad de impulsión están flojos	Apretar los pernos, verificar la alineación y corregirla, como sea requerido.
Cojinetes gastados o sueltos (vibración constante)	Inspeccionar los cojinetes y reemplazarlos si es necesario
Rodete desbalanceado (vibración intermitente)	Quitar el conjunto rotativo e inspeccionar cada impulsor para ver si pasajes obstruidos y daños. Quitar las substancias extrañas de los pasajes, reparar o reemplazar el impulsor y volver a balancearlo, como sea requerido.
Eje doblado	Retirar el eje, inspeccionar con el indicador cuadrante, enderezarlo y volver a verificar su rectitud con el indicador de cuadrante. Si la primera inspección indica que el eje está derecho, inspeccionar para ver si hay cojinetes, gastado o sueltos y reemplazarlos si así se requiere.
Cimiento poco sólido	Reforzar el cimiento. Una estructura fabricada es más probable de producir vibración que un cimiento de concreto.

Vibración transmitida desde la unidad de impulsión a la bomba	Desconectar los acoples y opere la unidad de impulsión a plena velocidad. Si la unidad de impulsión vibra, seguir las instrucciones del fabricante para tomar medidas correctivas
Variaciones repentinas en las líneas debido a una válvula de control gastada o instalada incorrectamente, transmitidas a la bomba	Reubicar o reparar la válvula de control.

Nota. Elaborado por fabricante.

Anexos 3: Distribuciones de probabilidad para cada modo de falla según de Reliasoft

Anexos 3.1

Distribución de probabilidad y parámetros de Fuga por sello en J-700.

Subsistema	J-700
Modo de falla	Fuga por sello
Distribución recomendada	Weibull 3 parámetros
Beta	0,286
Eta [h]	13548,764
Gamma [h]	7,341
MTTR (Log normal) [h]	153,382
Desviación estándar MTTR [h]	1,956

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.2

Distribución de probabilidad y parámetros de Desgaste de descanso en J-700.

Subsistema	J-700
Modo de falla	Sobrecalentamiento descanso
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	0,860
Eta (h)	52137,156
MTTR (Log normal) [h]	3,000
Desviación estándar MTTR [h]	0,000

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.3

Distribución de probabilidad y parámetros de Sobrecalentamiento del motor en J-700.

Subsistema	J-700
Modo de falla	Sobrecalentamiento del motor
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	0,367
Eta [h]	$2,816 \times 10^6$
MTTR (Log normal) [h]	2,000
Desviación estándar MTTR [h]	0,000

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.4

Distribución de probabilidad y parámetros de Fuga de flange en J-700.

Subsistema	J-700
Modo de falla	Fuga Flange
Distribución recomendada	Exponencial 1 parámetro
MTBF [h]	10834,443
MTTR (Log normal) [h]	183,840
Desviación estándar MTTR [h]	1,870

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.5

Distribución de probabilidad y parámetros de Desalineamiento de eje caja-motor en J-700.

Subsistema	J-700
Modo de falla	Vibraciones eje caja-bomba
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	2,254
Eta [h]	10926,069
MTTR (Log normal) [h]	280,000
Desviación estándar MTTR [h]	0,000

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.6

Distribución de probabilidad y parámetros de Fuga por sello en J-700S.

Susbsistema	J-700S
Modo de falla	Fuga de sello
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	0,74
Eta [h]	2120,94
MTTR (Log normal) [h]	192,926
Desviación estándar MTTR [h]	1,618

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.7

Distribución de probabilidad y parámetros de Bajo nivel de aceite en tanque de sistema de lubricación J-700S.

Subsistema	J-700S
Modo de falla	Bajo nivel de aceite en tanque de sistema de lubricación
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	0,538
Eta [h]	32917,698
MTTR (Log normal) [h]	110,083
Desviación estándar MTTR [h]	0,000

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.8

Distribución de probabilidad y parámetros de Fuga de sello J-700SPARE.

Subsistema	J-700SPARE
Modo de falla	Fuga de sello
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	0,74
Eta [hr]	2120,94
MTTR (Log normal) [h]	192,926
Desviación estándar MTTR [h]	1,618

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.9

Distribución de probabilidad y parámetros de Bajo nivel de aceite en tanque de sistema de lubricación J-700SPARE.

Subsistema	J-700SPARE
Modo de falla	Bajo nivel de aceite en tanque de sistema de lubricación
Distribución recomendada	Weibull 2 parámetros
Beta	0,538
Eta [h]	32917,698
MTTR (Log normal) [h]	110,083
Desviación estándar MTTR [h]	0,000

Nota. Elaboración propia.

Anexos 3.10

Distribución de probabilidad y parámetros de Fuga por sello en J-700N.

Subsistema	J-700N
Modo de falla	Fuga sello
Distribución recomendada	Exponencial 1 parámetro
MTBF [h]	35040,000
MTTR (Log normal)	179,000
Desviación estándar MTTR [h]	0,000

Nota. Elaboración propia.