



ASMAR
ASTILLEROS
DESDE 1895



Plan de mejora en la gestión de repuestos para mantención tipo overhaul de motores

MTU 16V2000M-90

Informe final proyecto pasantía

Ingeniería Civil Mecánica

Thomas Chellew Von Wachold

26 de diciembre de 2023

Índice

1. Resumen	5
2. Abstract	6
3. Introducción	7
3.1. Contexto de la empresa	7
3.2. Contexto del departamento de combustión interna	7
3.3. Mantenimiento tipo overhaul	8
4. Contexto del problema	9
5. Contexto de los costos	11
5.1. Precio en relación a los costos	12
5.1.1. Datos relevantes sobre la estructura de costos y precios	12
6. Objetivo General	13
7. Objetivos Específicos	13
8. Estado del arte y propuestas a soluciones	14
8.1. Gestión de riesgos en mantenimiento	14
8.1.1. Análisis de modos, efectos, fallas y criticidad (AMFEC)	15
8.1.2. Metodología AMFEC	15
8.1.3. Utilidades AMFEC	15
8.1.4. IPR	15
8.1.5. Caso académico	16
8.2. Reliability centre maintenance (RCM)	16
8.2.1. Árbol lógico de decisiones RCM	17
8.2.2. Caso académico	17
8.2.3. Proceso Homogéneo de Poisson	17
8.2.4. Método Max-Min	19
8.3. Estrategias de extensión de vida	20
8.4. Caso académico	21

8.5. Mantención por monitoreo de condición	21
8.5.1. Modelos de estimación de tiempo de vida restante	21
8.5.2. Caso académico	21
9. Soluciones posibles	22
9.1. Propuesta 1	22
9.2. Propuesta 2	22
9.3. Propuesta 3	23
9.4. Propuesta 4	23
9.5. Solución escogida	23
10. Metodología	24
11. Indicadores	26
12. Desarrollo del proyecto	28
12.1. Planificación	28
13. Matriz de riesgos del proyecto	29
13.1. Mitigación	30
14. Definiciones	31
14.1. Tabla de acciones según IPR	31
14.2. Matriz IPR	31
14.3. Limitaciones	32
14.4. Severidad	33
14.5. Ocurrencia	34
14.6. Detectabilidad	34
14.7. Diagrama de proceso AMFEC	35
14.8. Componentes reparables	36
14.9. Intervalo de inspecciones	36
14.10. Inventario de emergencia	36
14.11. Retardo logístico	37

15. Evaluación económica	38
15.1. Caso 1:	39
15.2. Caso 2:	40
15.3. Conclusión evaluación económica	40
16. Resultados	41
16.1. Identificación de repuestos a evaluar	41
16.1.1. Gráfico Pareto costos Lista Anticipada	41
16.2. Criterio de clasificación	41
16.2.1. Diagrama lógico de decisiones RCM	43
16.3. Categorización de repuestos	44
16.3.1. Identificación de repuestos a analizar	44
16.3.2. Retardo logístico de repuestos	44
16.3.3. IPR	45
16.4. Propuesta de mejora según categorización	46
16.4.1. Propuestas de mejora IPR bajo	46
16.4.2. Recomendación repuestos IPR medio	47
16.4.3. Recomendación repuestos reparables	47
16.4.4. Recomendación repuestos IPR alto	48
16.5. Discusión	49
16.6. Resumen repuestos descartados de la lista	50
16.7. Entregables	50
16.8. Indicadores Cuantitativos	51
16.9. Comparación de Costos Anteriores vs. Costos con Proyecto Implementado	51
17. Conclusión	52
18. Bibliografía	53
19. Anexo	55
19.1. Contexto motor 16V 2000 M-90 y contexto de operación	55
19.2. Ejemplo entregable AMFEC, Cañería de alta presión de combustible	56
19.2.1. Diagrama de bloque	56
19.2.2. AMFE cañería de alta presión de combustible	57

19.2.3. Estimación ocurrencia	58
19.2.4. Tasa de fallas	58
19.2.5. Probabilidad acumulada de fallas	58
19.2.6. Resultados estimación ocurrencia	59
19.2.7. Función de confiabilidad	59
19.3. Ejemplo árbol lógico de decisión RCM	60
19.4. Cuadro de mantenimiento preventivo MTU M-90	61

1. Resumen

Esta pasantía se llevó a cabo en ASMAR Valparaíso, una empresa cuya función principal es reparar y construir unidades de la Armada. El proyecto se enfoca en el departamento de combustión interna, cuya labor primordial es la mantención y reparación de motores marinos de la Armada de Chile.

El problema identificado en el área de combustión interna son los altos costos en la mantención tipo overhaul de los motores MTU 16V2000 M-90, lo que ha resultado en una pérdida de participación en el mercado, debido a que el representante de la marca, Detroit Chile, ofrece un precio más bajo.

En esta pasantía, se propuso como objetivo general crear un plan de mejora para la gestión de repuestos en mantenciones tipo overhaul para motores MTU 16V2000 M-90, con el objetivo de reducir los costos base en repuestos en un 20 %.

En este marco, el plan creado consiste en la evaluación de los repuestos de alto costo que eran objeto de cambio según el tiempo de uso y no por condición, se propuso alternativamente como estrategia maximizar la vida útil de estos componentes utilizando políticas como la reparación y reutilización. Para llevar a cabo esto, se estableció un criterio de selección de repuestos candidatos en donde se utilizaron herramientas como el análisis de modos, efectos, fallas y criticidad (AMFEC) y diagramas lógicos de decisión RCM.

El producto final de este proyecto es el diseño e implementación de un plan que permite a la empresa actualizar la lista de repuestos actual, la aplicación de este plan resultaría en la reducción de costos base de la lista de repuestos de un 27 % y la reducción en los costos de mantenimiento total del 21 % en cada mantenimiento tipo overhaul.

2. Abstract

This internship took place at ASMAR Valparaíso, a company whose main function is to repair and build vessels for the Navy. The project focused on the internal combustion department, responsible for the maintenance and repair of marine engines for the Chilean Navy.

The identified problem in the internal combustion area was the high maintenance costs, specifically for overhauling MTU 16V2000 M-90 engines. This issue led to a loss of market share as the brand representative, Detroit Chile, offered a lower price.

The overall objective of this internship was to create an improvement plan for spare parts management in overhauls of MTU 16V2000 M-90 engines, aiming to reduce base costs of spare parts by 20 %. The proposed plan involved evaluating high-cost spare parts that were traditionally replaced based on time rather than condition. An alternative strategy was suggested to maximize the lifespan of these components through policies such as repair and reuse.

To implement this, a selection criterion for candidate spare parts was established, utilizing tools such as Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) and RCM Logic tree diagrams. The final outcome of this project is the design and implementation of a plan that allows the company to update the current spare parts list, resulting in a 27 % reduction in base costs for the spare parts list and a 21 % total maintenance cost reduction per overhaul.

3. Introducción

3.1. Contexto de la empresa

Astilleros y maestranzas de la Armada de Chile, con la sigla ASMAR, es una empresa autónoma del Estado fundada en 1885. Se enfoca en la industria naval y de defensa, contando con sedes en Valparaíso, Talcahuano y Punta Arenas.

Su función principal es reparar y construir unidades para la Armada de Chile, sin embargo también lleva a cabo proyectos y reparaciones para clientes civiles cuando su capacidad le permite.

La infraestructura de la empresa está compuesta del edificio de administración, taller de electricidad y electrónica, taller de combustión interna, taller de estructura, taller de acero y, finalmente, el taller de botes Pumar. Cada sección ofrece servicios de reparación, manufactura y análisis de soluciones para la Armada y clientes particulares.

3.2. Contexto del departamento de combustión interna

El taller de combustión interna se centra principalmente en la mantención de motores marinos diesel, y se encuentra equipado con diversas instalaciones para atender de manera integral las necesidades de los clientes.

Las instalaciones cuentan con un banco de pruebas dinamométrico, de la mano de un área especializada para el arme y desarme de motores. Asimismo, incluye un espacio dedicado específicamente a la reparación de turbo cargadores y un banco de pruebas diseñado para probar quemadores de turbinas. Por otro lado, dispone de áreas de trabajo con control ambiental que garantizan condiciones óptimas en los procesos de reparación. Finalmente, cuenta con un sector de pintura y un espacio dedicado a los motores fuera de borda.

Por otra parte, se encuentran las oficinas en las cuales operan, el jefe de departamento, el ingeniero de producción, dos supervisores de producción, un preparador y un responsable de la gestión administrativa.

El equipo de mecánicos está formado por 20 técnicos, cada uno debidamente capacitado para realizar mantenimientos de una amplia gama de motores, incluyendo marcas como *Paxman, Caterpillar, Yanmar, MTU, Volvo, Pieltstck, Wartsila, Cummins, Mak, Perkins, Skandia*.

En la figura 1 se puede apreciar la distribución de servicios realizados en el taller de combustión interna por marca, las marcas más relevantes son *Volvo, MTU y CAT*.

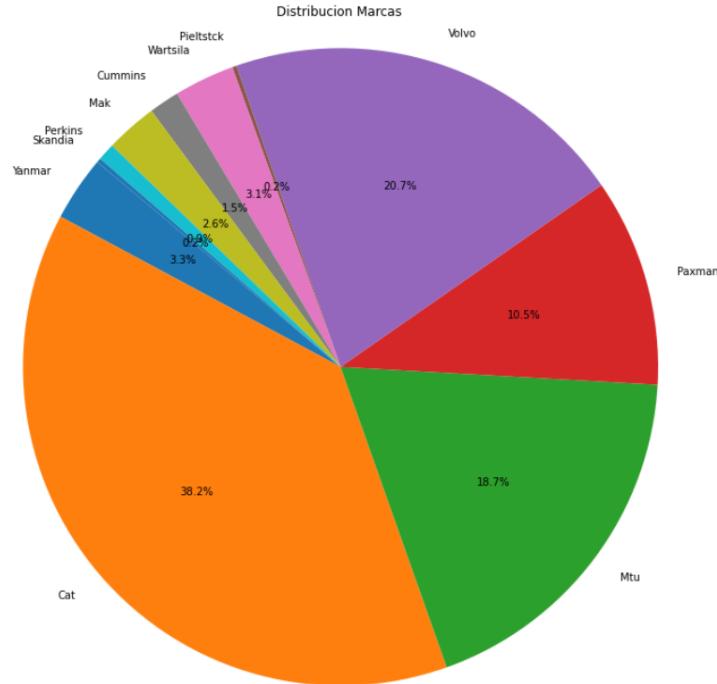


Figura 1: Distribución de servicios entre 2017-2022. Elaboración propia, 2023

3.3. Mantenimiento tipo overhaul

El proceso de mantenimiento tipo overhaul consiste en desmontar, inspeccionar y reacondicionar el motor en servicio con el propósito principal de restaurar su funcionamiento a un estado prácticamente nuevo. La ejecución de este procedimiento requiere una variada selección de repuestos y trae consigo la participación de mano de obra altamente especializada.

En la Figura 2, se ilustra el flujo de producción del mantenimiento. El proceso inicia con la emisión de la orden de compra de repuestos base, realizada meses antes de la recepción del motor. Posteriormente, se procede al desarme del motor, seguido de una minuciosa inspección de los componentes con el objetivo de determinar la necesidad de repuestos adicionales. A modo de ejemplo, si se lleva a cabo una inspección de la condición del eje cigüeñal, y este presenta deterioro, se solicita uno nuevo. La siguiente etapa comprende el ensamblaje del motor utilizando los nuevos componentes, seguido de pruebas dinamométricas para verificar el correcto funcionamiento del motor. Para finalizar el proceso, el motor reacondicionado se entrega al cliente.

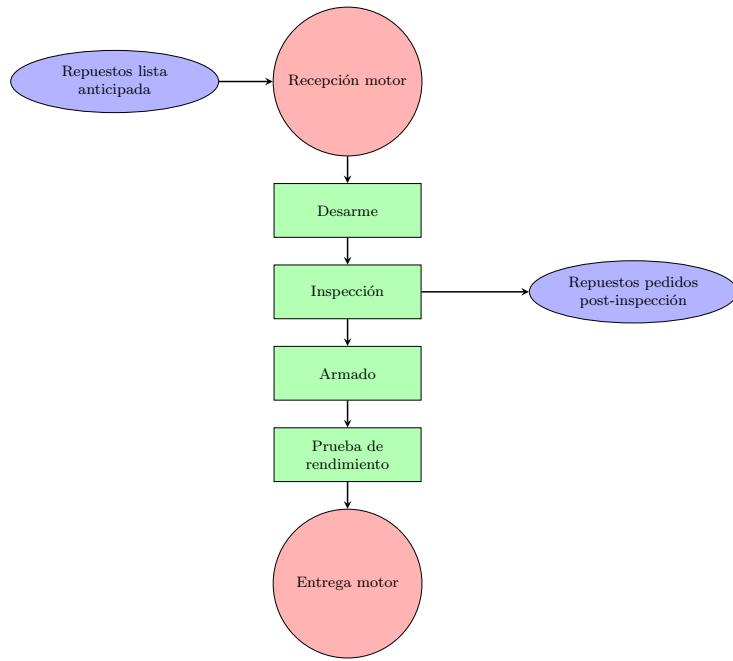


Figura 2: Diagrama de procesos, mantenimiento tipo overhaul. Elaboración propia, 2023

4. Contexto del problema

Dentro del contexto de ASMAR, ciertos motores se destacan por su relevancia, con un enfoque particular en los motores MTU 16V2000 M-90. Esta elección se fundamenta en la considerable demanda que poseen estos motores y en los ingresos que aportan a la empresa. En la actualidad, la Armada cuenta con un total de 32 motores de esta variante en operación.

En lo que respecta a los motores MTU M-90, la organización ha experimentado una disminución en su participación en el mercado desde el año 2021. Se ha analizado la demanda presentada en la figura 3 utilizando un enfoque intuitivo, y se ha llegado a la conclusión de que la demanda mínima esperada es de 4 overhauls al año. Sin embargo, entre los años 2021 y 2023, solo se llevó a cabo un overhaul anual en promedio.

La disminución en la cuota de mercado encuentra su origen en la entrada al mercado del representante de la marca MTU, Detroit Chile. La histórica reducción en la demanda se traduce en la pérdida aproximada de 9 oportunidades de overhaul entre 2021 y 2023. Si se considera que ASMAR tiene un costo base en el overhaul de 193.000 USD y el servicio de mantenimiento tipo overhaul se ofrece a un costo de 232.530 USD, esto se traduce en una pérdida estimada de ganancias de 355.770 USD entre los años 2021 y 2023.

Por lo tanto, el desafío actual radica en que ASMAR enfrenta dificultades para mantener su competitividad, lo que ha resultado en una pérdida significativa de cuota de mercado en el sector. Esto se debe a que no puede competir con Detroit, que cobra 200.000 USD por su servicio.

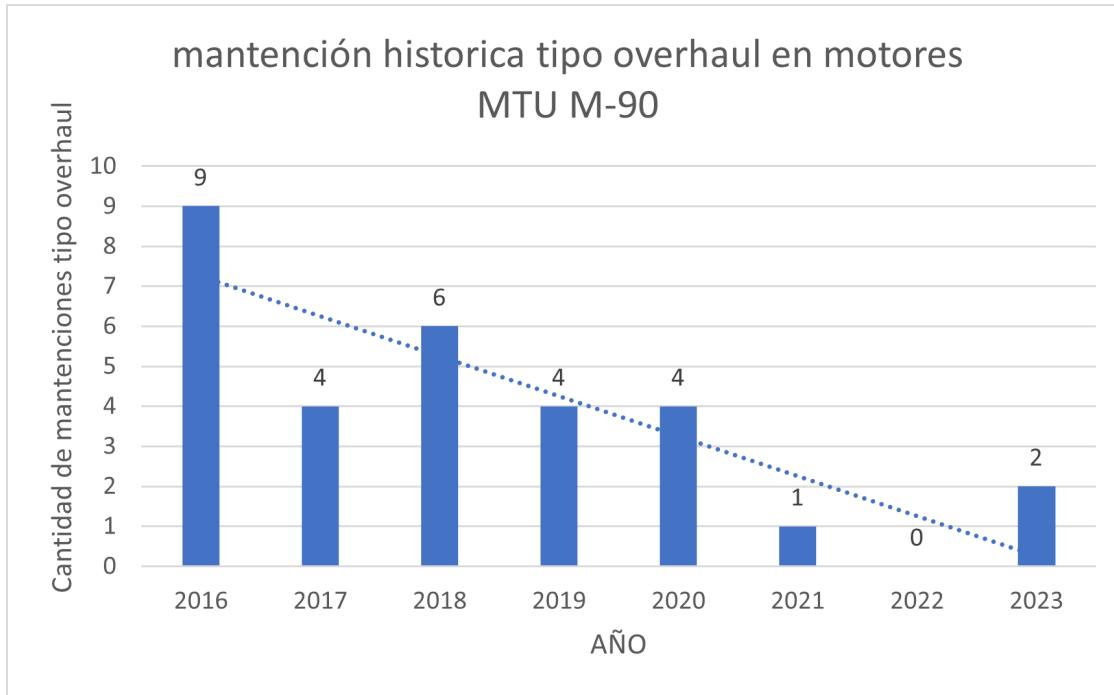


Figura 3: Overhauls por año. Elaboración propia, 2023

5. Contexto de los costos

Los costos base de la mantención tipo overhaul para los motores MTU M-90 se dividen en:

- Repuestos pedidos en la lista anticipada
- Horas de trabajo
- materiales y gastos directos
- Repuestos extra requeridos luego de una inspección del motor.

El costo de la lista de repuestos anticipada es de 138.000 USD, la suma de las horas de trabajo, materiales y gastos directos da un total aproximado de 55.000 USD.

Tras el desmontaje y evaluación del motor, es posible que se llegue a la conclusión de que se requieren repuestos adicionales a los mencionados en la lista inicial. Dichos costos adicionales son variables y dependen del estado del motor y de los componentes que necesiten ser reemplazados. Estos costos no se incluyen en la figura 4.

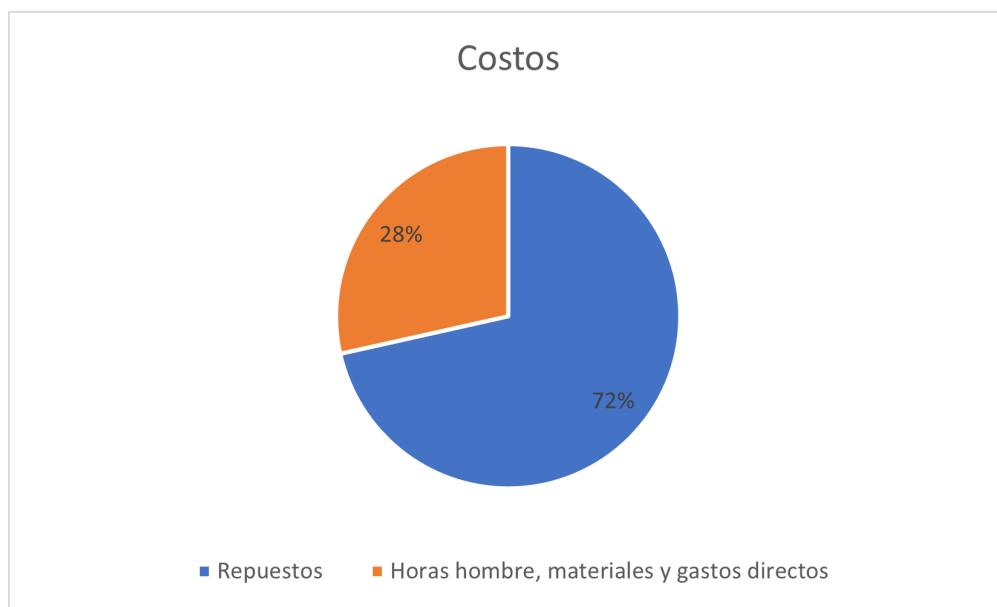


Figura 4: Desglose costos overhaul. Elaboración propia, 2023

Se puede apreciar en la figura 4 que los costos en repuestos son más relevantes que las Horas-Hombre, materiales y gastos directos, por lo tanto son los costos a evaluar en este proyecto.

5.1. Precio en relación a los costos

El precio de venta en USD se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{(C_r + 55,000)}{1 - M_g}$$

- P : Precio de venta
- C_r : Costo en repuestos
- M_g : Margen deseado en ganancias.

5.1.1. Datos relevantes sobre la estructura de costos y precios

1. El costo de repuestos actual es de 138.000 USD y el margen de ganancias que busca ASMAR es de 17 % por lo tanto, el precio de venta es de 232.530 USD.
2. Para equiparar a la competencia se busca tener un precio de 200.000 USD, por lo tanto, el costo en repuestos buscado es de 111.000 USD, esto se traduce en una reducción del 27.000 USD es decir, en un 20 %.

6. Objetivo General

El objetivo general de este proyecto es crear un plan de mejora de la gestión actual de repuestos en las mantenciones tipo overhaul del motor MTU 16v2000 M-90, con el fin de reducir los costos en repuestos base en un 20 % para las mantenciones del próximo año. De esta manera, se espera reducir la brecha entre la competencia y ASMAR.

7. Objetivos Específicos

- **Identificar repuestos de alto costo:** Se realiza un análisis sobre la lista de repuestos actual de overhaul en donde se identifican los repuestos que presenten los costos más altos.
- **Establecer un criterio para categorizar los repuestos de alto costo:** Una vez elegidos los repuestos de alto costo a evaluar, se establece un criterio para categorizarlos, se realiza una extensa evaluación académica sobre las metodologías utilizadas en proyectos similares.
- **Categorizar los repuestos aplicando el criterio establecido:** Se categorizan los repuestos aplicando el criterio seleccionado.
- **Proponer mejora en la gestión de repuestos utilizando el criterio establecido:** Finalmente, se propone una mejora en la gestión para cada repuesto bajo el criterio establecido y con la información recopilada.

8. Estado del arte y propuestas a soluciones

A continuación se realiza una descripción general sobre métodos utilizados en la literatura el cual tienen como objetivo mejorar el mantenimiento de un activo y la gestión de repuestos.

8.1. Gestión de riesgos en mantenimiento

En cualquier operación, siempre existe cierto grado de riesgo. Una mala política de mantenimiento puede resultar en baja confiabilidad de un equipo, reducción de la disponibilidad de un producto, el aumento en costos de operación e incluso perdida de vidas humanas.

Según Campbell et.al. (2019), la mantención preventiva puede reducir los riesgos de falla de un equipo. Sin embargo, las empresas no tienen recursos ilimitados para invertir en mantención. Asimismo, el aumento en mantención preventiva no siempre resulta en una disminución en las fallas, por lo tanto, la gestión de riesgos en mantenimiento consiste en buscar el nivel óptimo en donde los costos en mantenimiento preventivo y el costo de inactividad del equipo sean mínimos.

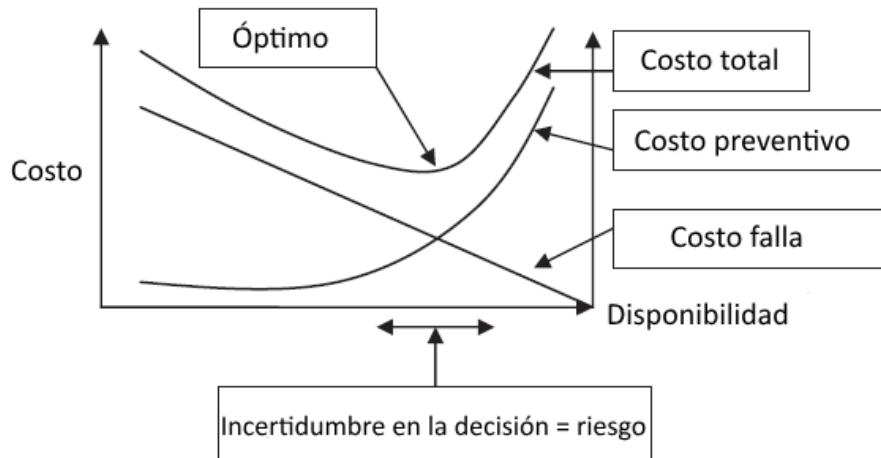


Figura 5: Curva de optimización,mantenimiento preventivo. Adaptado de (Campbell et.al., 2019)

La figura 5 ilustra la situación mencionada anteriormente, aunque esto es un concepto valioso, es difícil conocer el óptimo entre el mantenimiento preventivo adicional y su impacto en la disponibilidad de un equipo.

8.1.1. Análisis de modos, efectos, fallas y criticidad (AMFEC)

Una herramienta útil para gestionar los riesgos en mantenimiento es el análisis de modos, efectos y falla (AMFE). AMFE es una técnica que entrega un estudio metódico de las consecuencias que provocan las fallas de cada componente mantenable del equipo. Tiene como propósito eliminar o minimizar el riesgo asociado a estas. El análisis de criticidad clasifica la gravedad de la falla y la probabilidad de ocurrencia, al realizar ambos pasos, el resultado es el análisis de modos, efectos y criticidad (AMFEC). En algunos casos, se agrega la detectabilidad de la falla como indicador para determinar la criticidad.

8.1.2. Metodología AMFEC

- Definir el sistema y sus requisitos de rendimiento
- Definir supuestos y reglas básicas a utilizar en el análisis
- Enumerar todos los componentes individuales y sus funciones con el nivel de detalle requerido
- Desarrollar un diagrama de bloques del sistema
- Idear una hoja de trabajo de análisis para proporcionar información sobre fallas y efectos de cada componente, junto con información relevante
- Clasificar cada modo de falla potencial bajo su severidad y probabilidad de ocurrencia (Campbell et.al., 2019).

8.1.3. Utilidades AMFEC

AMFEC se puede utilizar para definir inspecciones de calidad, establecer acciones de mantenimiento preventivo, definir limitantes operativas, establecer acciones correctiva y realizar estudios de compensación.

8.1.4. IPR

El índice de prioridad de riesgo es un indicador que permite establecer la criticidad de cada repuesto. Se establece como el producto entre la severidad, ocurrencia y detectabilidad del componente, este índice determina la estrategia a utilizar (Stamatis, 2003) .

8.1.5. Caso académico

Con el fin de evaluar los posibles riesgos en la operación de un motor marino Diesel, Saputra et al. (2018) llevó a cabo un Análisis de Modo y efecto de falla (AMFE) de su sistema de combustible. Posteriormente, el autor realizó un análisis de criticidad de las posibles fallas, utilizando el Índice de Prioridad de Riesgo (IPR), el cual combina la severidad (S), la ocurrencia de la falla (O) y la detectabilidad de la falla (D). El análisis concluyó que los componentes con un IPR más alto tenían como causa de falla la contaminación del combustible. Por lo tanto, el autor recomendó limpiar el tanque de combustible y cambiar los filtros de combustible con mayor frecuencia.

8.2. Reliability centre maintenance (RCM)

Reliability Centered Maintenance (RCM), es un proceso lógico y técnico que determina qué tareas de mantenimiento garantizarán un sistema confiable, según lo diseñado, bajo condiciones de operación específicas y en un entorno operativo también determinado (Campbell,2019). Según la norma SAE JA1011 se deben cumplir los siguientes requisitos para aplicar la metodología RCM.

- Delimitar el contexto operativo
- Determinar como un activo puede fallar realizando sus funciones
- Definir las causas de cada falla funcional
- Describir que sucede cuando ocurre cada falla
- Clasificar los efectos de cada falla
- Determinar que se debe hacer para prevenir o predecir las fallas.

8.2.1. Árbol lógico de decisiones RCM

Un árbol lógico de decisiones RCM, es una herramienta utilizada para analizar las fallas funcionales a través de una serie de preguntas de decisión. Estas ayudan a determinar el impacto de una falla en la operación, seguridad y costos de una organización. Así mismo, puede ser utilizada para determinar la estrategia de mantenimiento más adecuada para cada componente o equipo en un sistema. (Moubray, 2001)

En la figura 23, se aprecia un árbol lógico de decisiones RCM. El autor Afefy (2010) lo utiliza con el objetivo de determinar qué estrategia de mantenimiento es la más adecuada para cada máquina de una planta procesadora de cloruro de sodio.

8.2.2. Caso académico

Angelina et.al. (2020) aplicó la metodología RCM en una planta procesadora de alimento, en donde realizó un análisis AMFEC con el fin de identificar los repuestos críticos. En esa misma línea, hizo una predicción de la demanda para cada repuesto utilizando el proceso de Poisson homogéneo y el método de máximos-mínimos, lo que resultó en una mejora en la disponibilidad de la máquina y en la producción.

8.2.3. Proceso Homogéneo de Poisson

Proceso de Poisson es un proceso estocástico utilizado generalmente para modelar tiempos entre falla de sistemas reparables, está dado por la siguiente función:

$$\mathcal{L}(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (1)$$

donde:

- \mathcal{L} es la función de verosimilitud.
- θ son los parámetros de la distribución.
- $f(x_i; \theta)$ es la función de densidad de probabilidad evaluada en el punto x_i con parámetros θ .

La función de distribución de Poisson está dada por:

$$P(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2)$$

donde:

- $P(k)$ es la probabilidad de que K eventos pasen durante un tiempo determinado.
- λ es el parámetro de la distribución de Poisson, que representa la tasa media de eventos por unidad de tiempo o espacio.
- e es número de Euler
- $k!$ es el factorial de k .

El proceso homogéneo de Poisson es el modelo más simple utilizado en sistemas reparables, no puede ser utilizado para modelar sistemas en deterioro o mejora, pues λ debe ser constante (Item 1008/153 | Repositorio CIMAT, 2016).

8.2.4. Método Max-Min

Este método consiste en determinar un mínimo y un máximo de inventario admisible en el sistema, al llegar al mínimo, se debe pedir repuestos con el fin de alcanzar el inventario máximo.

$$SS = C \cdot T \quad (3)$$

donde:

- SS es el stock de seguridad (stock mínimo).
- C es el consumo mínimo.
- T es el tiempo de reposición de inventario.

La fórmula para el cálculo de EM (existencia máxima) se expresa como:

$$EM = (CMX \cdot T) + SS \quad (4)$$

donde:

- EM es la existencia máxima.
- CMX es el consumo máximo.
- T es el tiempo de reposición de inventario.
- SS es el stock de seguridad.

8.3. Estrategias de extensión de vida

Debido a la competitividad en el mercado, los altos costos en mantenimiento y la intención de reducir la contaminación ambiental, las empresas están considerando la integración de estrategias que permitan extender la vida de componentes y sistemas (Wakiru et al., 2021).

Se puede maximizar la vida útil de componentes aplicando las siguientes estrategias:

- Reparación: implica restaurar un componente a su estado original o a un estado operativo. Se considera que la acción de reparación puede dejar el componente en un estado “tan bueno como nuevo” o “tan malo como antes” (Wakiru et al., 2021).
- Modificaciones del componente: tienen como objetivo mejorar el rendimiento y la tolerancia al daño de los componentes, tales como agregar un tratamiento superficial o agregar una capa protectora.
- Reutilizar componentes: Reutilización de componentes: se define como el reúso del producto para el mismo propósito que fue concebido, sin reparación o renovación significativa. Según Immarigeon et al. (2003), en muchos casos, la vida útil real de los componentes supera la estimada por los fabricantes.

Una de las metodologías utilizadas para maximizar la vida de componentes es la metodología “damage tolerance based life cycle management”, la cual consiste en el monitoreo del daño en un componente mediante inspecciones periódicas. Cuando el componente o sistema llega a un punto crítico de deterioro, se retira. Para implementar esta estrategia, es esencial considerar las posibles repercusiones operativas en caso de una potencial falla. Además, se debe llevar a cabo un análisis de costo-efectividad de la estrategia propuesta.

8.4. Caso académico

Immarigeon et al. (2003) utilizó estrategias de extensión de vida en motores Rolls Royce Nene X, los cuales son utilizados por la fuerza aérea canadiense.

La metodología empleada es la siguiente:

- Análisis de Modos, Efectos, Fallas y Criticidad (AMFEC) para establecer la criticidad del repuesto.
- Realizar un análisis costo-beneficio (CBA), donde se realiza la comparación entre reemplazar la pieza o implementar una estrategia de extensión de vida.
- Aplicar estrategias de extensión de vida a repuestos seleccionados.

El autor propuso reparar las hélices de la turbina de un motor CF 404 y, además, se reutilizó un motor más allá de su estimado mediante monitoreo de temperatura y control de fisuras.

8.5. Mantención por monitoreo de condición

El monitoreo por condición es el proceso de observar un conjunto de parámetros y/o variables que indican el estado del sistema bajo investigación. Juega un rol significativo en el mantenimiento, gestión y operaciones sostenibles de diversos sectores, como lo es en la industria manufacturera, el sector de transporte, energía y en el ámbito de la salud. En la mayoría de los casos, se utilizan sensores o microcontroladores para llevar a cabo el monitoreo. Las técnicas más comunes de monitoreo son el análisis de vibraciones, análisis de aceite, análisis de temperatura y tintas penetrantes (Ali & Abdelhadi, 2022b).

8.5.1. Modelos de estimación de tiempo de vida restante

La información recopilada a través del monitoreo por condición puede ser utilizada para desarrollar un modelo de estimación de tiempo de vida. Este modelo consiste en analizar los parámetros del sistema con el objetivo de predecir su comportamiento, permitiendo anticipar si el equipo necesita una reparación o un reemplazo antes de tiempo (Baru & Johnson, 2023).

8.5.2. Caso académico

Vega (2019b) tiene como objetivo determinar la vida útil de las camisas de los cilindros de un motor Wartsila 12v32 LN. El enfoque de la investigación implica el monitoreo tanto de la presión en el cárter como del desgaste de las camisas, con el propósito de establecer una relación significativa entre estas dos variables, lo que le permitió predecir la vida útil de las camisas con base a la información recopilada.

9. Soluciones posibles

Frente al problema identificado, se proponen las siguientes alternativas como solución:

9.1. Propuesta 1

Siguiendo el estado del arte (véase [8.1](#)), una estrategia para disminuir los costos en mantenimiento sin comprometer la confiabilidad del sistema es llevar a cabo un Análisis de Modo, efecto, falla y criticidad (AMFEC) en el motor MTU M-90. De esta manera, se pueden identificar los modos de falla con Índice de Prioridad de Riesgo (IPR) más elevado, permitiendo así mitigar la ocurrencia de estos. Como resultado, se podría reducir la incidencia de fallas correctivas, disminuyendo en consecuencia los costos asociados al mantenimiento.

A pesar de los beneficios mencionados, el problema identificado en el proyecto son los elevados costos asociados al mantenimiento tipo overhaul. La realización de este análisis no impacta directamente en los costos del overhaul dado que, la lista de repuestos base es independiente al estado de deterioro del motor. Es posible que los costos de los repuestos solicitados posterior a la inspección varíen, pero estos cambios solo serían perceptibles a largo plazo.

Adicionalmente, llevar a cabo un AMFEC en todos los sistemas del motor podría requerir un tiempo que excede los límites temporales establecidos para el proyecto.

9.2. Propuesta 2

Prosiguiendo con el estado del arte (véase [8.2.2](#)), una solución posible consiste en llevar a cabo un Análisis de Modo y Efecto de Falla y criticidad (AMFEC) con el propósito de identificar la criticidad de los repuestos. Una vez que se haya identificado la criticidad, se propone estimar la demanda de los mismos, con el fin de predecir el inventario necesario para la mantención tipo overhaul.

Si bien el análisis AMFEC es útil para el proyecto, estimar una demanda mejoraría los tiempos de espera de repuestos post-inspección, pero no reduciría los costos en la mantención.

9.3. Propuesta 3

A continuación (véase 8.4), al implementar estrategias destinadas a prolongar la vida útil de los componentes se podrían reducir los costos en mantención de manera significativa, sin comprometer la confiabilidad. Para llegar a cabo esto, se debe establecer la criticidad de cada componente mediante un AMFEC para posteriormente evaluar que tipo de estrategia de extensión de vida se puede implementar.

9.4. Propuesta 4

Permaneciendo en el estado del arte (véase 8.5), al implementar estrategias como el monitoreo por condición, se plantea la posibilidad de posponer el reemplazo de componentes que estén siendo monitoreados, lo que permitiría excluir dichos componentes de la lista base de repuestos del mantenimiento tipo overhaul. Posteriormente, la información recopilada a través del monitoreo podría ser empleada para desarrollar un modelo predictivo de fallas. De este modo, el modelo facilitaría la determinación de intervalos de reemplazo más eficientes desde una perspectiva de costos.

El monitoreo por condición se posiciona como una herramienta valiosa para la ejecución del proyecto. No obstante, la creación de un modelo predictivo requiere la recopilación de datos, la cual, en la actualidad, no se encuentra disponible.

9.5. Solución escogida

En relación con las propuestas previamente expuestas, se decide como solución utilizar estrategias de extensión de vida y monitoreo por condición en los componentes de alto costo de la lista anticipada de repuestos, proponiendo el reúso y reparación. Esta elección se argumenta debido a que impacta directamente en los costos de mantenimiento tipo overhaul. La implementación de estas estrategias permite la actualización de la lista anticipada. Para llevar a cabo este proceso, se estableció una metodología que abarca las variables relevantes que permiten seleccionar los repuestos candidatos. De esta forma, se utilizaron herramientas expuestas en el estado del arte, como AMFEC y Árbol lógico de decisiones RCM.

10. Metodología

- **Identificar repuestos de alto costo:** Se identificaron los repuestos de la lista anticipada y se procedió a determinar cuáles de ellos implicaban los mayores costos. Posteriormente, se definió la cantidad de repuestos de alto costo que se evaluarán en el proyecto. Esta cantidad está condicionada por el tiempo disponible para la realización del proyecto y la proporción de costos que representan con respecto al total de la lista.
- **Establecer un criterio para categorizar los repuestos seleccionados:**
 - Se llevó a cabo un análisis detallado de las variables y parámetros cruciales que influyen en la elaboración de la lista de repuestos anticipada, incluyendo factores como el retardo logístico.
 - Se realizó una revisión académica con el propósito de identificar la herramienta más apropiada para gestionar los riesgos en mantenimiento, concluyendo que el AMFEC es la opción más idónea.
 - Basándose en la información recopilada en los pasos anteriores, se diseñó un diagrama lógico de decisiones RCM. Para su desarrollo, se tomó como referencia el árbol lógico de decisión RCM utilizado por (Afefy, 2010) (Véase la figura 23) y el libro 'Asset Management Excellence' de Campbell et al. (2016).
- **Categorizar los repuestos aplicando el criterio seleccionado:** Se clasificaron los repuestos aplicando el árbol lógico de decisión RCM y realizando un AMFEC utilizando la norma MIL-STD-1629A y el libro 'Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution' (Stamatis, 2003b) como referencia. La información para realizar la categorización se extrajo de:
 - Manual de mantenimiento MTU 16V 2000 M
 - Técnicos en mantenimiento especializado para MTU M-90
 - Base de datos OREDA 2002
 - Base de datos de mantenimiento Armada (Servimada)
 - Artículos académicos
 - Información proporcionada por el representante Detroit Diesel Chile.

■ **Proponer mejora en la gestión de repuestos utilizando el criterio establecido:** Con base en el paso anterior, se proponen mejoras en la gestión de los repuestos. Las estrategias en mejoras en la gestión están basadas en el estado del arte y son las siguientes:

1. Con base en la categorización, se recomendó la reutilización del componente definiendo un intervalo de inspección de condición, o bien, el reúso del componente con la condición de tener un inventario de emergencia.
2. Según la categoría asignada, se optó por la reparación del componente, para lo cual se evaluaron:
 - La capacidad de reparación de la planta
 - Los costos estimados de la reparación
 - Los repuestos nuevos necesarios.
3. Dependiendo de la categoría, se propone un plan de mitigación de las causas del modo de falla potencial del componente.

11. Indicadores

- **Reducción del costo en porcentaje:**

C_i : Costo de la lista anticipada luego de la reducción de repuestos

C_s : Costo mejora en la gestión

C_a : Costo lista de repuestos actual.

$$\left(1 - \frac{(C_i + C_s)}{C_a}\right) \times 100 \quad (5)$$

Este indicador representa el porcentaje de reducción en los costos de mantenimiento tipo overhaul después de implementar mejoras en la gestión de repuestos.

- **Indicador binario de realización de análisis de repuestos de alto costo:**

x : Porcentaje de completitud del análisis.

La función escalón unitario se denota como $H(x)$ y se define como:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 100 \\ 1 & \text{si } x = 100 \end{cases} \quad (6)$$

Cuando $H(x)$ toma el valor de 0, significa que el análisis no está completo; Al tomar el valor de 1, significa que el análisis se ha completado.

- **Indicador binario que indica si se ha establecido un criterio para clasificar repuestos de alto costo:**

Y : Porcentaje de completitud del análisis.

La función escalón unitario se denota como $H(Y)$ y se define como:

$$H(Y) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y < 100 \\ 1 & \text{si } Y = 100 \end{cases} \quad (7)$$

Cuando $H(Y)$ toma el valor de 0, significa que el análisis no está completo.

- **Porcentaje de completitud de categorización de repuestos en comparación al total elegido:**

N: cantidad de repuestos categorizados completamente.

H: Cantidad de repuestos seleccionados a evaluar.

$$\left(\frac{N}{H} \right) \times 100 \quad (8)$$

Este indicador muestra el porcentaje de repuestos evaluados con la metodología sobre el total elegido.

- **Porcentaje de mejoras de gestión propuestas sobre la cantidad de repuestos evaluados:**

S: Cantidad de mejoras de gestión propuestas.

N: Número de repuestos evaluados.

$$\left(\frac{S}{N} \right) \times 100 \quad (9)$$

Este indicador indica el porcentaje de mejoras de gestión propuestas sobre el total de repuestos evaluados.

12. Desarrollo del proyecto

A continuación, se expone el desarrollo de los objetivos específicos planteados anteriormente, se presenta la matriz de riesgos del proyecto y se muestran definiciones relevantes del proyecto.

12.1. Planificación

En la figura 6, se presentan los hitos clave que marcan el avance del proyecto, destacando la completitud de los objetivos específicos.

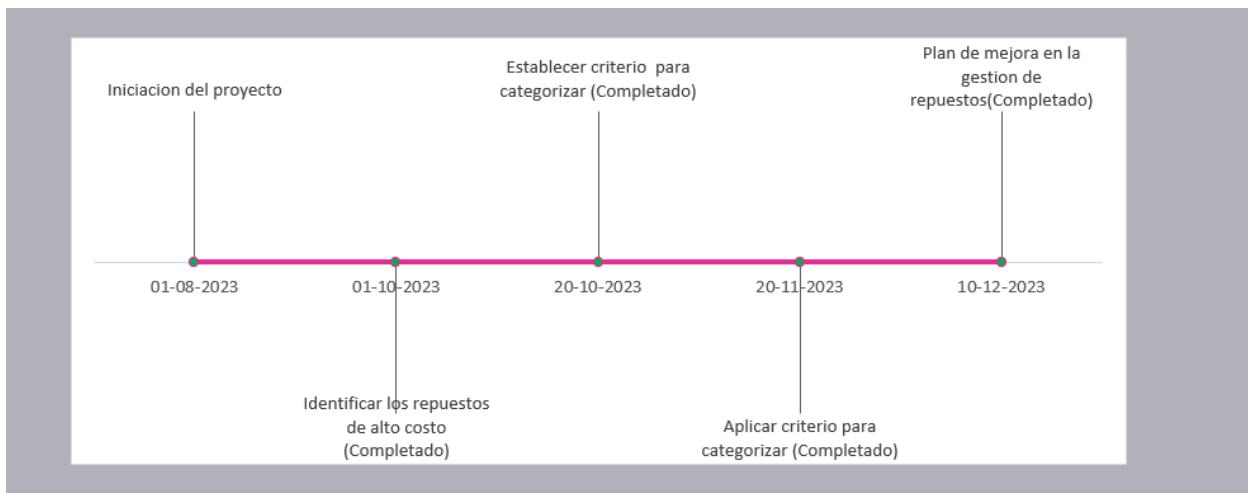


Figura 6: Diagrama de hitos del proyecto real. Elaboración propia, 2023

1. Identificar repuestos de alto costo a analizar.(completado)
2. Establecer criterio para categorizar los repuestos.(completado)
3. Aplicar criterio para categorizar.(completado)
4. Proponer plan de mejora en la gestión de repuestos(completado)

13. Matriz de riesgos del proyecto

Se elabora matriz de riesgo según la norma ISO 45001(2018).

- Riesgos potenciales:

- Durante el AMFEC, se podría tener dificultades para estimar una ocurrencia de fallas debido a la falta de recopilación de datos.
- Podría ser difícil estimar un costo de reparación de un componente debido a que los componentes reparables pueden ser de alta complejidad.
- Al realizar un AMFEC utilizando la opinión de expertos, se podría llegar a modos de falla, causas y efectos totalmente contrarios de un componente.

		MATRIZ DE RIESGOS				
		CONSECUENCIA				
		Mínima	Menor	Moderada	Mayor	Máxima
PROBABILIDAD		1	2	3	4	5
Muy Alta	5	5	10	15	20	25
Alta	4	4	8	12	16	20
Media	3	3	6	9	12	15
Baja	2	2	4	6	8	10
Muy Baja	1	1	2	3	4	5

Figura 7: Matriz de riesgo. Elaboración propia, 2023

NIVEL DEL RIESGO	COLOR
Riesgo Aceptable	Verde
Riesgo Tolerable	Amarillo
Riesgo Alto	Rojo
Riesgo Extremo	Rojo

Figura 8: Rango de riesgo. Elaboración propia, 2023

Riesgos	Probabilidad	Consecuencia	Total
Riesgo 1:	5	2	10
Riesgo 2:	3	2	6
Riesgo 3:	4	2	8

Figura 9: Tabla con valores. Elaboración propia, 2023

13.1. Mitigación

- Para disminuir el riesgo de estimar erróneamente la ocurrencia debido a falta de información cuantitativa, la norma MIL-STD-1629 estipula que se pueden utilizar métodos cualitativos para estimarla, estos pueden ser comparaciones con equipos similares, Experiencia de técnicos e información académica.
- El costo de reparación va a depender principalmente del repuesto que se necesite cambiar del componente, para estimar correctamente el costo de reparación se determinó cuáles son los insumos necesarios y las horas de trabajo necesarias para realizar la reparación.
- Para mitigar este riesgo, en los casos que hay discrepancias de los modos de falla se utilizó información disponible en el ámbito académico.

14. Definiciones

14.1. Tabla de acciones según IPR

En el cuadro 1, se indican las acciones recomendadas según el nivel de riesgo. De acuerdo con Stamatis (2003b), un IPR inferior a 100 se considera de bajo riesgo con un 90 % de confianza. Por lo tanto, se establece que los repuestos con un IPR menor a 100 son candidatos para la reutilización.

Niveles de IPR	Nivel de riesgo	Acción requerida
]400-1000]	Alto	Recomendación de mitigación requerida
]100-400]	Medio	Se mantiene la gestión actual
$100 \geq IPR$	Bajo	Aceptable, evaluar extender la vida del repuesto

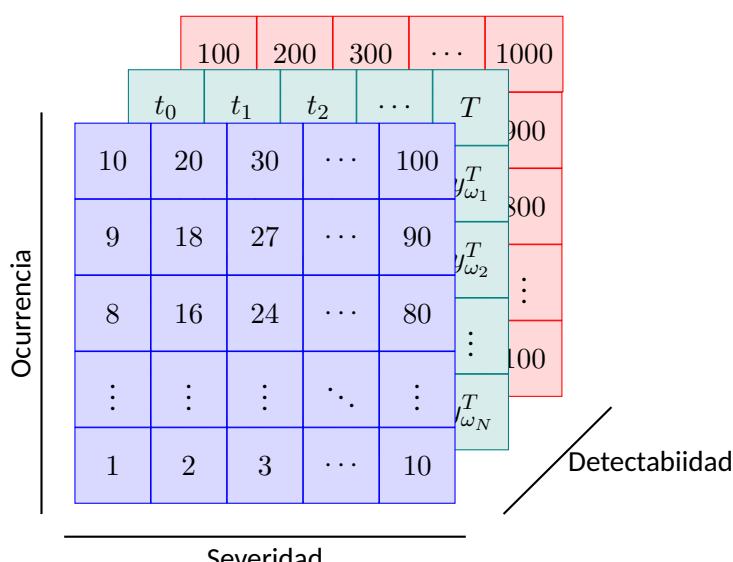
Cuadro 1: Tabla IPR. Elaboración propia, 2023

14.2. Matriz IPR

$$S \cdot O \cdot D = IPR \quad (10)$$

Se clasifican los repuestos bajo los siguientes indicadores:

- Severidad
- Ocurrencia
- Detectabilidad



14.3. Limitaciones

Una de las desventajas del sistema IPR es su propensión a generar información incorrecta al multiplicar los factores de severidad, ocurrencia y detectabilidad. En ocasiones, esto puede llevar a que un modo de falla menos grave obtenga un valor de IPR más alto que uno más grave. Por lo tanto, además de utilizar el puntaje IPR, se deben considerar los puntajes individuales en situaciones específicas y cuando sea necesario (Aslan,2016).

14.4. Severidad

La severidad se refiere a la evaluación de los riesgos asociados con una posible falla del repuesto, tanto en términos de su impacto en el personal como en el equipo, véase el cuadro 2.

Severidad	Criterio	Ranking
Extremadamente alto	El efecto de la falla es nocivo para la seguridad del operador	10
Peligrosamente alto	El efecto es igual al de arriba pero hay un aviso	9
Muy alto	El equipo no está operativo y pierde su función primaria	8
Alto	Equipo operativo pero con baja performance, hay insatisfacción del cliente y degradación del equipo	7
Moderado	Mal funcionamiento parcial del producto	6
Bajo	El producto se puede reacondicionar y existe molestia del cliente	5
Muy bajo	Componente tiene un comportamiento fuera de lo normal, la falla puede ser percibida por algunos clientes	4
Menor	Componente tiene un comportamiento fuera de lo normal, la falla puede ser percibida por el cliente promedio	3
Insignificante	Componente tiene un comportamiento fuera de lo normal, la falla puede ser percibida solo por algunos clientes	2
Ninguno	No hay efecto	1

Cuadro 2: Criterio de severidad. Adaptado de (Saputra, Priharanto, Latif, 2018)

14.5. Ocurrencia

La ocurrencia se define como la frecuencia en que una potencial causa/mecanismo suceda en un componente durante su tiempo operativo de vida. En este proyecto, Debido a la poca información de fallas correctivas disponible, se estimó la ocurrencia utilizando métodos cualitativos recomendados en la norma MIL-STD-1628A y el libro '*Failure mode and effect analysis: FMEA from Theory to Execution*' de Stamatis (2003b) como la investigación, experiencia técnica y la comparación con sistemas similares. En el caso de que la información esté disponible, se utiliza la base de datos de falla correctiva del cliente para estimar la ocurrencia o la base de datos OREDA offshore reliability 2002. En el entregable AMFEC se menciona cuál es la fuente de información utilizada para cada componente. Véase el cuadro (3).

Ocurrencia	Criterio	frecuencia	ranking
Extremadamente alto	Falla es casi inevitable	$x \geq 0.2$	10-9
Alto	Falla repetitiva	$0.2 > x \geq 0.1$	8-7
Moderado	Falla ocasional	$0.1 > x \geq 0.01$	6-4
Bajo	Relativamente pocas fallas	$0.01 > x \geq 0.001$	3-2
Remoto	Falla es remota	$0.001 > x$	1

Cuadro 3: Criterio ocurrencia. Adaptado de (Saputra, Priharanto, Latif, 2018)

14.6. Detectabilidad

La detectabilidad se refiere a la probabilidad de que un posible modo de falla sea identificado por el operador. Cuanto más difícil sea detectar una falla existente y más tiempo tome hacerlo, mayores pueden ser las consecuencias. Véase el cuadro 4.

Detectabilidad	Criterio	Ranking
Incertidumbre absoluta	Imposible detectar la falla.	10-9
Remota	Dificultad para detectar la falla.	8-7
Baja	Baja chance de detectar la falla.	6-4
Media	Chance moderada de detectar la falla.	3-2
Alta	Alta chance de detectar la falla.	1

Cuadro 4: Criterio de detectabilidad. adaptado de (Saputra, Priharanto,Latif, 2018)

14.7. Diagrama de proceso AMFEC

En la figura 10 se presentan los pasos a seguir para realizar AMFEC a cada componente elegido.

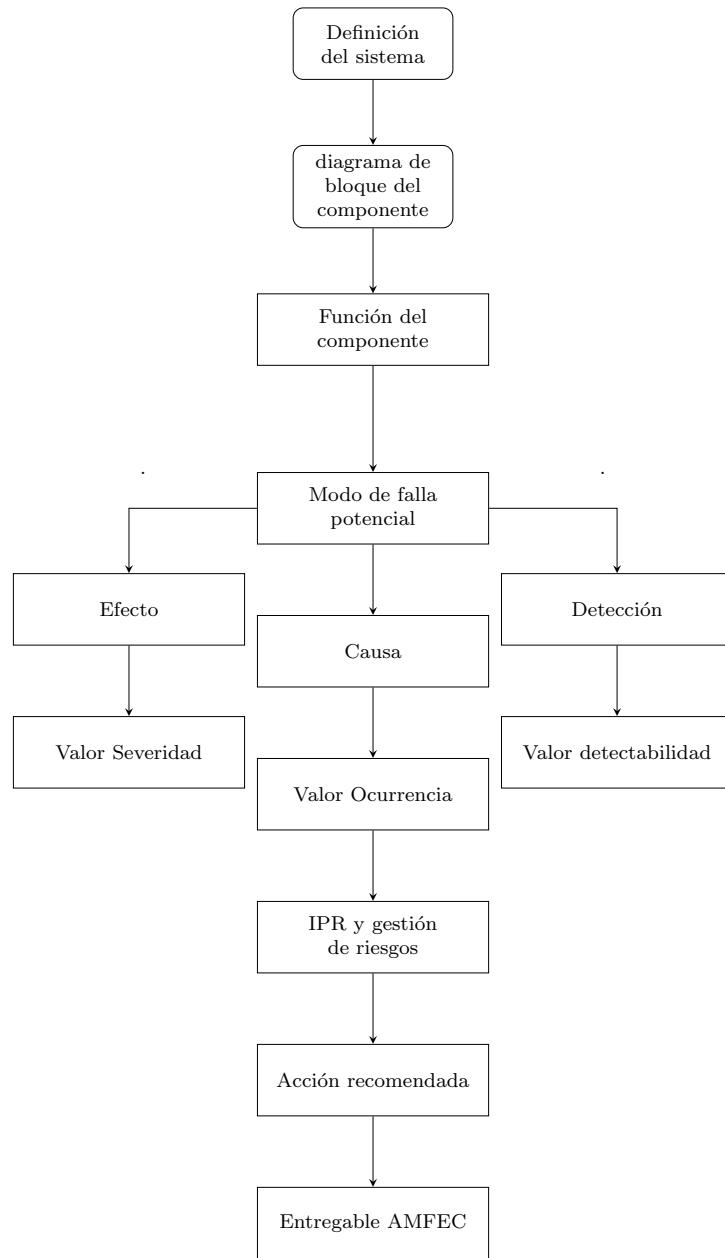


Figura 10: Diagrama AMFEC Adaptado de (Saputra, Priharanto, Latif, 2018)

14.8. Componentes reparables

Al realizar la reparación, se asume que el componente queda en un estado similar a uno «como nuevo» (De Carlo y Arleo, 2017). Por lo tanto, no se establece un intervalo de monitoreo por parte de ASMAR.

El criterio de si un componente es reparable se lleva a cabo mediante el Manual de mantenimiento MTU 16V 2000 M. Se evaluaron las capacidades de reparación en la planta ASMAR Valparaíso y, finalmente, se estima un costo aproximado de reparación, incluyendo los repuestos extra necesarios .

La siguiente ecuación describe el costo total de reparación en términos de horas hombre (H) y (C) costo de repuestos adicionales:

$$\text{Costo total} = H + C$$

14.9. Intervalo de inspecciones

Para aquellos componentes con IPR bajo, que permiten un seguimiento continuo de su condición, se estableció un intervalo de inspección a bordo. Este proceso implica una evaluación detallada del plan de mantenimiento existente, (Véase la figura 24) ajustándolo para determinar el momento más propicio para llevar a cabo la inspección. Por ejemplo, si el manual establece que se debe realizar una regulación de válvulas cada 1000 horas, se aprovecha este trabajo programado para inspeccionar otros componentes relacionados con el control de válvulas. Este enfoque garantiza la eficiencia y reduce los costos adicionales asociados.

14.10. Inventario de emergencia

Para aquellos componentes con un IPR bajo, en los cuales no es posible llevar a cabo un monitoreo de su condición, debido a la falta de un parámetro específico que permita determinar la degradación del componente, se decide establecer un inventario de emergencia, en caso de que el repuesto falle antes de lo esperado.

14.11. Retardo logístico

El retardo logístico se refiere al tiempo adicional que puede ocurrir en la cadena de suministro de bienes o servicios. Esto, puede afectar en las fechas de cumplimiento estipuladas en los contratos. El tiempo de espera de un repuesto es un indicador importante para ASMAR, ya que influye en la lista de repuestos anticipada, por lo tanto, influye en el costo total.

Para evaluar si es factible descartar un repuesto de la lista anticipada sin afectar la producción se determina el RL máximo recomendado mediante la siguiente fórmula.

- Tiempo de retardo logístico máximo(meses): T_c
- Tiempo establecido de entrega(meses): T_e
- Tiempo inspección(meses): T_d

$$T_c \leq T_e - T_d \quad (11)$$

El tiempo aproximado de mantenimiento tipo overhaul de los motores MTU M-90 es de 3 meses y el tiempo de inspección de los componentes es alrededor de 1 mes. Por lo tanto, si se descarta un componente de la lista anticipada de repuestos debe tener como máximo un retardo logístico de 2 meses .

15. Evaluación económica

Para esta evaluación económica se realizan los siguiente supuestos:

- Se llega a la meta propuesta en el objetivo general de reducir los costos en repuestos en un 20 %
- Para el primer caso se asume que la situación sin proyecto es la demanda actual de 1 overhaul y la situación con proyecto es la demanda esperada de 4 mantenimientos tipo overhaul anuales.
- Para el segundo caso se analiza la situación en que la reducción del precio no tiene un impacto en la demanda.
- Se asume que el precio de los repuestos se mantiene constante.
- Para realizar la evaluación económica del proyecto, se usa una tasa de descuento del 14 %, que es la utilizada por ASMAR.
- Costo total de repuestos en la situación sin proyecto (SSP) es de 138.000 USD (IVA incluido).
- Costo de repuestos total en la situación con proyecto (SCP) es de 110.400 USD (IVA incluido).
- El costo de la mejora de gestión implementada tiene un valor estimado de 4278 USD y se aplica anualmente.
- No se calcula la tasa interna de retorno(TIR), ya que como no hay inversión inicial, nos daría un valor infinito.
- Como no hay inversión y los costos son constantes, es irrelevante la cantidad de periodos evaluados, aun así se realiza la evaluación 5 periodos.

15.1. Caso 1:

Se evalúa la situación hipotética en donde hay un aumento en la demanda debido a la baja de precios, como es una empresa en marcha, se hace una comparación entre la situación sin proyecto (SSP) y la situación con proyecto (SCP) y el VAN se calcula con el Δ del flujo de caja. Para el primer caso se asume que la (SSP) es la demanda actual de 1 overhaul y la (SCP) provoca un aumento en la demanda esperada a 4 overhauls anuales. Esto nos da un $\Delta VAN = 249.416$ USD , por lo tanto, el proyecto es conveniente.

LA REDUCCION DEL PRECIO NO SIGNIFICA EN UN AUMENTO DE LA DEMANDA						
SSP	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$232.530	\$232.530	\$232.530	\$232.530	\$232.530
CV		-\$193.000	-\$193.000	-\$193.000	-\$193.000	-\$193.000
CF						
UAI		\$39.530	\$39.530	\$39.530	\$39.530	\$39.530
TAX		-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673
UDI		\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857
Flujo caja priv	\$0	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857
SCP	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$817.952	\$817.952	\$817.952	\$817.952	\$817.952
CV		-\$678.900	-\$678.900	-\$678.900	-\$678.900	-\$678.900
CF						
UAI		\$139.052	\$139.052	\$139.052	\$139.052	\$139.052
TAX		-\$37.544	-\$37.544	-\$37.544	-\$37.544	-\$37.544
UDI		\$101.508	\$101.508	\$101.508	\$101.508	\$101.508
Flujo operacional		\$101.508	\$101.508	\$101.508	\$101.508	\$101.508
Delta flujo	\$0	\$72.651	\$72.651	\$72.651	\$72.651	\$72.651

Figura 11: Flujo caja caso 1. Elaboración propia, 2023

15.2. Caso 2:

En este caso, se evaluó una situación hipotética en la que la reducción del precio no tiene un impacto en la demanda. Si se disminuye el precio a 200.000 USD, el proyecto no sería conveniente. En cambio, el precio de venta tendría que ser de 209.208 USD para que el proyecto sea conveniente, es decir, $\Delta VAN \geq 0$.

LA REDUCCION DEL PRECIO NO SIGNIFICA EN UN AUMENTO DE LA DEMANDA						
SSP	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$232.530	\$232.530	\$232.530	\$232.530	\$232.530
CV		-\$193.000	-\$193.000	-\$193.000	-\$193.000	-\$193.000
CF						
UAI		\$39.530	\$39.530	\$39.530	\$39.530	\$39.530
TAX		-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673
UDI		\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857
Flujo caja priv	\$0	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857
SCP	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$209.208	\$209.208	\$209.208	\$209.208	\$209.208
CV		-\$169.678	-\$169.678	-\$169.678	-\$169.678	-\$169.678
CF						
UAI		\$39.530	\$39.530	\$39.530	\$39.530	\$39.530
TAX		-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673	-\$10.673
UDI		\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857
Flujo operació	\$0	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857	\$28.857
Delta flujo	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0

Figura 12: Flujo caja caso 2. Elaboración propia, 2023

15.3. Conclusión evaluación económica

En el primer caso, se observa que la disminución del costo conlleva a un aumento en la demanda, lo que resulta en un $\Delta VAN = 249.416$ USD, por lo tanto, el proyecto es conveniente. Sin embargo, en el segundo caso, se requiere vender el servicio a 209.208 USD y aumentar el margen de ganancias en un 2 % para que sea conveniente. A pesar de que este precio de venta es mayor al de la competencia, que es de 200.000 USD, sigue siendo más atractivo para el cliente en comparación con los 232.530 USD anteriores. En conclusión, se recomienda llevar a cabo el proyecto independientemente del comportamiento de la demanda futura.

16. Resultados

16.1. Identificación de repuestos a evaluar

Siguiendo la metodología (véase sección 10), se evaluaron 30 repuestos que representan los costos más altos de la lista anticipada, estos 30 repuestos corresponden al 66 % del total de los costos, lo que equivalen a 77.000 USD.

El gráfico de Pareto de la figura 13 destaca de manera más evidente que un reducido porcentaje de elementos representa la mayor proporción de los costos en la lista prevista.

16.1.1. Gráfico Pareto costos Lista Anticipada

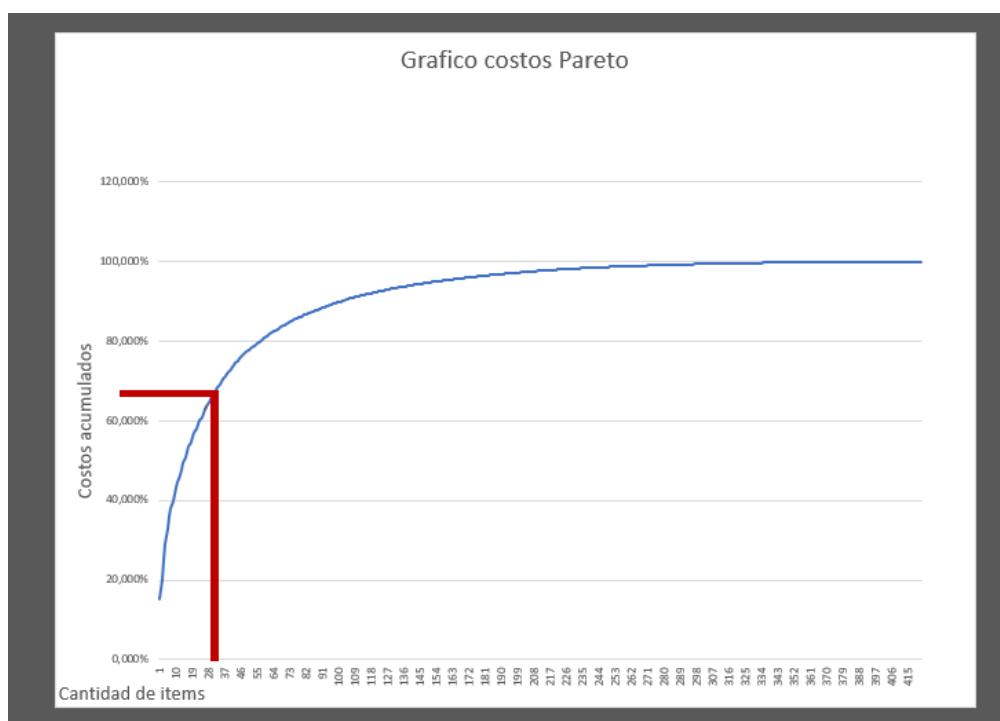


Figura 13: Gráfico costos Pareto. Elaboración propia, 2023

16.2. Criterio de clasificación

Siguiendo con la metodología, se estableció un criterio para clasificar los repuestos desarrollando un diagrama lógico de decisiones RCM (véase el entregable 14) el cual tiene las siguientes características:

- Se filtraron los repuestos que no tienen capacidad de mejorar la gestión debido a que son de un solo uso como empaquetaduras, sellos, elementos de sacrificio, elementos de goma.

- Se llevó a cabo una evaluación del retardo logístico(RL) que tiene cada repuesto evaluado, esto se hace con el propósito de determinar el tiempo de espera estimado de un repuesto, el RL es una de las variables que permite determinar si se debe mantener el repuesto en la lista anticipada o descartarlo. Se calculó el máximo RL recomendado en la sección [14.11](#).
- Se realizó un (AMFEC) en los repuestos seleccionados. Se propuso una estrategia de gestión personalizada dependiendo de las características y el índice de riesgo(IPR) (vease[8.1.4](#)) que tenga cada repuesto. Las estrategias de gestión posibles son: Estrategias de extensión de vida como:
 1. Dependiendo del IPR se propuso reúso e intervalo de inspección de condición o reúso con un inventario de emergencia.
 2. Dependiendo del AMFEC y manual se propuso la reparación del componente. Se determina:
 - Capacidad de reparación de la planta.
 - Costos estimados de reparación.
 - Repuestos nuevos requeridos.
 3. Dependiendo del IPR se propuso un plan de mitigación de las causas del modo de falla potencial del componente.

Para realizar el AMFEC se utilizó como referencia la norma MIL-STD-1629 y libro de Stamatis (2003).

La información se analizó utilizando principalmente la opinión de expertos, en este caso, los técnicos en MTU M-90. Más información sobre el AMFEC en la sección [8.1.1](#).

- Se determinó si es factible monitorear la condición a bordo de los repuestos, en el caso de que lo sea, se determina la forma y el intervalo de inspección recomendado.
- En el caso de que no sea factible monitorear el estado del repuesto, se evalúo si se reutiliza sin inspección, determinando si $S > 7$ esto es debido a que, según lo establecido en tabla [2](#) los modos de falla mayores a 7 causan un deterioro acelerado del sistema, por lo tanto, solo es factible usar esta estrategia si el repuesto tiene una severidad del modo de falla menor a 7, en este caso se debe determinar un inventario de emergencia en caso de que el componente falle en operación.
- Según el análisis realizado se entregaron las mejoras en la gestión propuestas a la empresa y la lista de repuestos anticipada actualizada.

16.2.1. Diagrama lógico de decisiones RCM

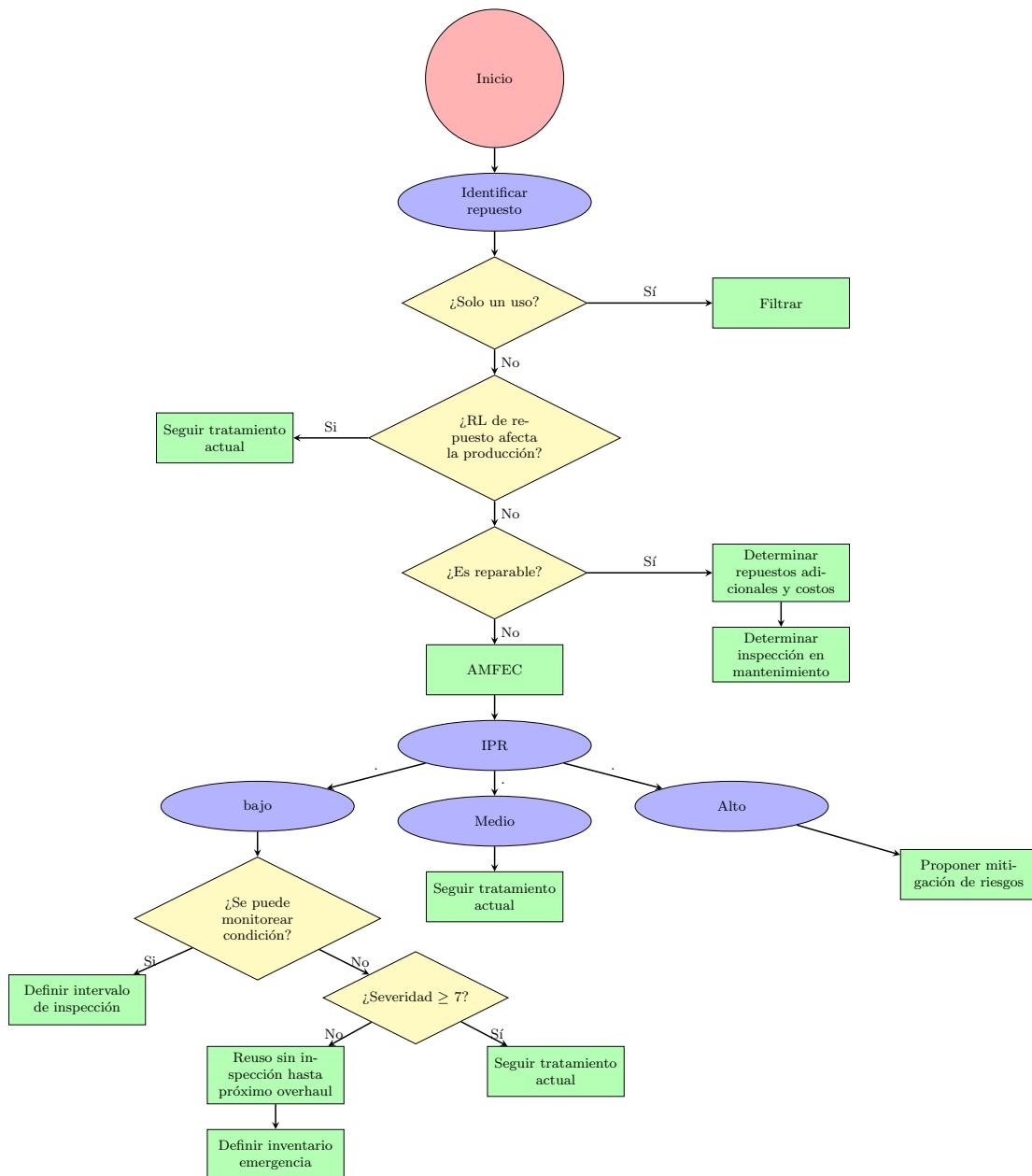


Figura 14: Diagrama lógico de decisiones RCM, elaboración propia (Entregable), 2023

16.3. Categorización de repuestos

A continuación, se muestran los resultados de aplicar el criterio establecido en el paso anterior.

16.3.1. Identificación de repuestos a analizar

Siguiendo la metodología, se identificaron los 30 repuestos de alto costo a evaluar, se realizó un primer filtro de los repuestos que no tienen capacidad de mejora.

	Primer filtro	AMFEC	Total
Cantidad	11	19	30

Cuadro 5: Elaboración propia, 2023

16.3.2. Retardo logístico de repuestos

De los 19 repuestos seleccionados a evaluar, todos tienen un RL de 2 meses, según lo estipulado en la sección [14.11](#), el RL máximo es de 2 meses, por lo tanto, los 19 repuestos pasan a la siguiente etapa según el diagrama lógico de la metodología (véase la figura [14](#)).

16.3.3. IPR

Se realizó un AMFEC a 19 componentes de alto costo seleccionados, los resultados de este análisis se ven en la figura 15.

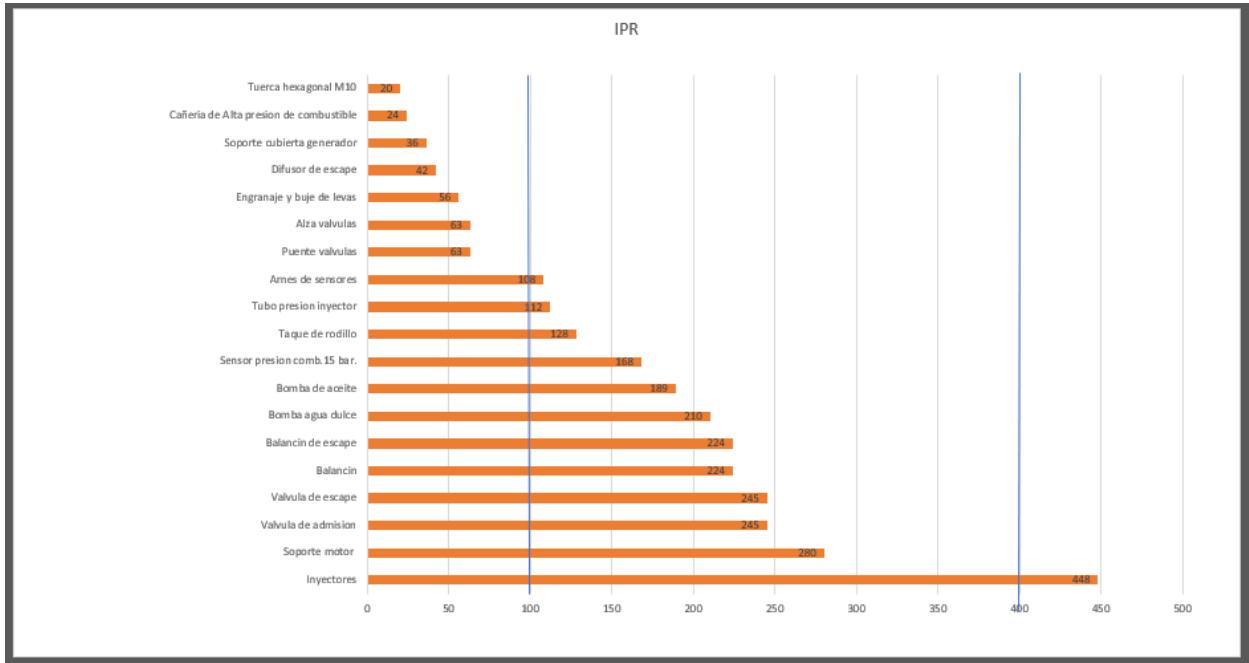


Figura 15: Tabla con valores IPR. Elaboración propia, 2023

El cuadro 9 muestra un resumen de la cantidad de componentes que cae en cada categoría según su IPR y si es reparable o no.

Categorías	Nivel de riesgo	Cantidad	Acción requerida
] $400 - 1000]$	Alto	1	Recomendación de mitigación de requerida
] $100 - 400]$	Medio	7	Se mantiene la gestión actual
$100 \geq IPR$	Bajo	6	Aceptable, evaluar extender la vida del repuesto
Reparable	NA	5	Definir costos e inspección en mantenimiento

Cuadro 6: Resumen resultado IPR. Elaboración propia, 2023

16.4. Propuesta de mejora según categorización

A continuación se muestra un resumen de las mejoras en gestión propuestas.

16.4.1. Propuestas de mejora IPR bajo

Según la metodología establecida, los componentes descritos en el cuadro 7, pueden ser descartados de la lista de repuestos anticipada, en el cuadro 7 se establecen las propuestas recomendadas para realizar esto.

En el cuadro 8 se presenta el inventario de emergencia para cada repuesto que lo requiera y el intervalo de inspección establecido para los componentes que se puede monitorear su condición, esto se realizó siguiendo lo descrito en la sección 14.10 y 14.9.

Como caso especial, se propuso la utilización de un repuesto alternativo para la tuerca hexagonal M10. Este repuesto presenta una baja complejidad, y se sugiere la elección de una tuerca que cumpla con la misma norma de fabricación (DIN-934) y una calidad de 12.

Componente	Propuesta mejora
Puente válvulas	Reúso mediante monitoreo de condición
Alza válvulas	Reúso mediante monitoreo de condición
Tuerca hexagonal M10	Compra de repuesto alternativo
Engranaje y buje de levas	Seguir tratamiento actual
Cañería de alta presión	Reúso sin monitoreo, tener inventario de emergencia
Difusor de escape	Reúso sin monitoreo, tener inventario de emergencia

Cuadro 7: Propuesta mejora IPR bajo. Elaboración propia, 2023

Componente	Inventario de emergencia	Intervalo de inspección(hrs)	Costo(USD)
Puente válvulas	0	1000	0
Alza válvulas	0	1000	0
Tuerca hexagonal M10	NA	NA	36
Cañería de alta presión	2	NA	2201
Difusor de escape	2	NA	160
Total			2397

Cuadro 8: Propuesta mejora IPR bajo. Elaboración propia, 2023

16.4.2. Recomendación repuestos IPR medio

Como se menciona en la metodología, (véase figura 14) los repuestos con un IPR medio mantienen su tratamiento actual. Los repuestos en esta categoría son los siguientes:

Componente
Tubo presión inyector
taqué de rodillo
Balancín de escape
Balancín
Válvula de admisión
Válvula de escape

Cuadro 9: Componentes IPR medio. Elaboración propia, 2023

16.4.3. Recomendación repuestos reparables

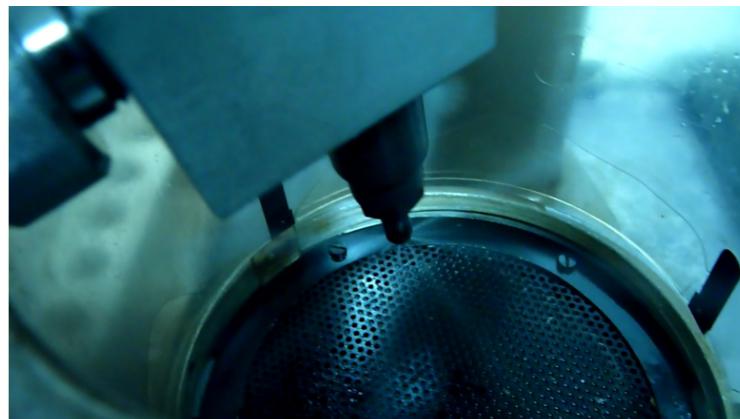
Luego de un exhaustivo análisis, se recomienda sacar de la lista anticipada los componentes del cuadro 10 ya que, son reparables.

Componente	Costo reparación (USD)
Bomba agua dulce	691
Bomba de aceite	995
Arnés de sensores	156
Soporte cubierta generador	39
Total	1881

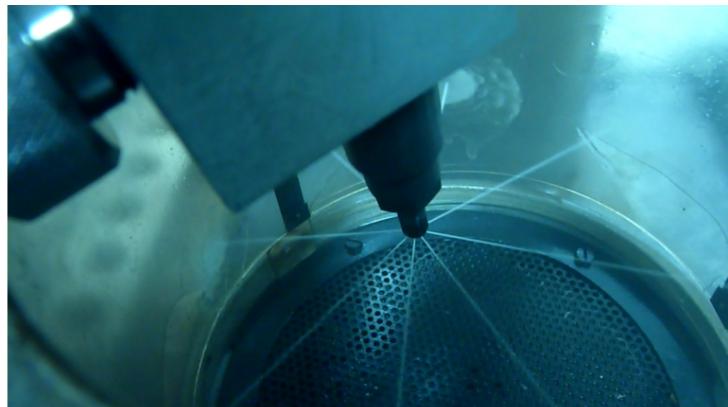
Cuadro 10: Costos de reparación repuestos reparables. Elaboración propia, 2023

16.4.4. Recomendación repuestos IPR alto

Los inyectores son el componente con el modo de falla con mayor IPR evaluado. El modo de falla de los inyectores en el motor modelo MTU M-90 es debido a la cavitación y erosión en la cabeza del inyector provocando así, el deterioramiento acelerado de las válvulas, camisas y pistones, esto es debido a la mala proyección del combustible en la cámara de combustión.



(a) Buen pulverizado.



(b) Mal pulverizado.

Figura 16: Funcionamiento inyector. Fuente: Detroit Chile (2015)

El mal pulverizado del combustible, causa la generación de hollín, (Soot en inglés), esto provoca la mala lubricación entre la camisa y el pistón. Asimismo, el mal pulverizado puede causar que el combustible se mezcle con el lubricante, esto provoca que el lubricante pierda sus propiedades y deteriore aceleradamente las camisas,los pistones y las válvulas.



Figura 17: Mala proyección del combustible al pistón en motor MTU M-90. Imagen propia, 2023

En la figura 17, se observa una proyección inadecuada del combustible hacia el pistón, evidenciada por marcas que indican que la proyección no se ha dirigido correctamente hacia la zona diseñada, sino hacia la pared.

La razón principal de la alta ocurrencia de la falla de los inyectores es la mala calidad del combustible utilizado por el cliente, al mejorar la calidad del combustible se puede retrasar el deterioro de los inyectores y por consiguiente retrasar el deterioro de camisas, pistones y válvulas.

16.5. Discusión

Se puede concluir de la metodología que los componentes con (IPR) bajo y los reparables son los principales contribuyentes al cumplimiento del objetivo general del proyecto. La propuesta solución para los repuestos con IPR alto tiene el potencial de mejorar indirectamente los costos asociados a la mantención debido a que podría alargar la vida de pistones y camisas.

16.6. Resumen repuestos descartados de la lista

A continuación, se presenta un resumen de los resultados.

Componente	Cantidad	Precio unitario(USD)	Precio total(USD)
Cañería de combustible	16	1100,64	17610,24
Bomba de agua dulce	1	4689,96	4689,96
Bomba de aceite	1	3360,15	3360,15
Arnés de sensores	1	1834,63	1834,63
Puente válvulas	32	56,31	1801,92
Alza válvulas	32	56,31	1801,92
Difusor de escape	16	79,88	1278,08
Tuerca hexagonal M10	46	26,81	1233,26
Soporte cubierta generador	1	1220,95	1220,95
Sensor presión comb. 15 BAR	1	1040,37	1040,37
Precio			35789,157
Costo solución			4278
Reducción de costo total			31511

Cuadro 11: Tabla de repuestos descartados de la lista. Elaboración propia, 2023

16.7. Entregables

Se entregaron a la empresa los siguientes elementos:

- Identificación de repuestos de alto costo.
- Árbol lógico de decisión RCM.
- AMFEC de 19 repuestos, incluyendo evaluación de retardo logístico y repuestos reparables.
- Recomendaciones individuales para cada repuesto.

16.8. Indicadores Cuantitativos

A continuación, se evalúan los indicadores de progreso del proyecto.

- Al analizar el primer indicador (véase la ecuación 5), se obtiene que el nuevo costo de la lista anticipada es $C_i = 96.549$ USD, el costo de mejora en la gestión es $C_s = 4.278$ USD, y el valor de la lista anticipada actual es $C_a = 138.761$ USD.

Esto resulta en una reducción de costos de la lista base del 27 %.

- Al evaluar el segundo indicador (véase la ecuación 6), se determinó que, se ha completado el análisis de los repuestos de alto costo, $H(x) = 1$.
- Al evaluar el tercer indicador (véase la ecuación 7), se establece que, se definió completamente el criterio para clasificar repuestos de alto costo, $H(y) = 1$.
- Al analizar el cuarto indicador (véase la ecuación 8), se tiene que, $N = 30$ y $H = 30$, por lo tanto, se obtiene un porcentaje de completitud del análisis de repuestos del 100 %.
- Al evaluar el quinto indicador (véase la ecuación 9), se tiene que, $S = 15$, y se evaluaron 30 repuestos. Por lo tanto, del total de repuestos evaluados y crearon 15 propuestas de mejora en la gestión, es decir un 50 %. El resto de repuestos se determinó que era mejor mantener la situación actual.

16.9. Comparación de Costos Anteriores vs. Costos con Proyecto Implementado

Con la reducción del 27 % en los costos de mantenimiento, se logra un nuevo costo de lista anticipada de 96.549 USD. Por lo tanto, el precio de venta puede reducirse a 209.266 USD, cumpliendo así con el objetivo general del proyecto.

	Situación sin proyecto	Situación con proyecto
Costo lista anticipada (IVA incluido)	138.761 USD	96.549 USD
Precio venta mantenimiento overhaul	232.530 USD	209.266 USD

Cuadro 12: Comparación de costos, SSP VS SCP. Elaboración propia, 2023

17. Conclusión

La ejecución de este proyecto en el proceso de mantenimiento tipo overhaul de los motores MTU 16V2000M90 resultaría en una reducción de costos del 27 % en la lista base y una disminución total del 16 % en los costos de mantenimiento. Por lo tanto, la mejora en la gestión se traduce en un precio más competitivo en el mercado y podría potencialmente aumentar la demanda de mantenimientos anuales. Además, la metodología diseñada ofrece un enfoque imparcial y respaldado académicamente para gestionar los riesgos asociados con la actualización de la lista de repuestos.

Esta metodología no se limita exclusivamente al motor MTU M-90, sino que es aplicable a todo el parque de motores atendido por ASMAR, lo que abre la oportunidad de mejorar la gestión de repuestos para otros tipos de motores mantenidos en la planta. Por otro lado, la reutilización de repuestos lleva consigo un cierto grado de riesgo, por lo tanto, esta metodología se justifica principalmente si existe la necesidad de reducir los costos en mantención.

La implementación de inspecciones por condición proporciona una valiosa recopilación de datos que permite una determinación más efectiva del ciclo de vida de los componentes. Esta información posibilita la modelación del tiempo de vida restante de los componentes monitoreados, lo cual representaría en un avance significativo al permitir prever el momento de fallo de un componente sin la necesidad de monitorear continuamente su condición.

Finalmente, el uso eficiente de repuestos no solo mejora los costos, sino que también contribuye positivamente a la sostenibilidad ambiental. Esta contribución es especialmente relevante en el contexto actual, ya que se alinea con el Objetivo 12 de las Naciones Unidas: *Consumo y producción responsable* (UNICEF and the sustainable development goals, s.f.).

18. Bibliografía

- Saputra, R. S. H., Priharanto, Y. E., & Latif, A. MZ (2018). *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Applied for Risk Assessment of Fuel Oil System on Diesel Engine of Fishing Vessel*. ARPN Journal of Engineering and Applied Science, 13(21), 8414-8420.
- Aslan, O. (2016). *RISK ANALYSIS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE VALVE PRODUCTION USING FMEA METHOD*. GİDB Dergi, (05), 33-42.
- Campbell, J. D., Jardine, A., & McGlynn, J. (2019). *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*, 2/E. CRC Press eBooks. Disponible en: <http://ci.nii.ac.jp/ncid/>
- Asmar (s.f.). *Vision*. Asmar. <https://www.asmar.cl/corporacion/vision/>
- Chrysler Corporation (1995). *Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. Disponible en: https://www.lehigh.edu/~intribos/Resources/SAE_FMEA.pdf
- Norma SAE JA1011 – *Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*. (s/f). PDMTECH. Recuperado el 4 de octubre de 2023, de <https://pdmtechusa.com/criterios-evaluacion-rm>
- Reliabilityweb.com. (2021, diciembre 16). *Análisis ISO 14224 /oreda*. Reliabilityweb. <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/analisis-iso-14224-oreda>
- <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/45789>. (2016, n.f.) *ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS EN LOS EQUIPOS DE LAVANDERIA DEL HOSPITAL REGIONAL DE CONCEPCIÓN*. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/45789>
- Angelina, C., Atmajii, F. T. D., & Santosa, B. (2020). *Spare part requirement and inventory policy for Rovema's 1 machine using Reliability Centered Spare (RCS) and Min-Max stock methods*. IOP Conference Series, 722(1), 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/722/1/012017>
- Item 1008/153 | Repositorio CIMAT. (2016, 22 noviembre). <http://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1008/153>
- Ali, A., & Abdelhadi, A. (2022). *Condition-Based Monitoring and Maintenance: State of the Art review*. Applied sciences, 12(2), 688. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020688>

- Vega, F. (2019). CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL DE LAS CAMISAS DE LOS CILINDROS DEL MOTOR WARTSILA 12V32 LN. www.academia.edu. <https://www.academia.edu/40195392>
- Wolfram Research, Inc. (s. f.). Heaviside Step Function – from Wolfram MathWorld. <https://mathworld.wolfram.com/HeavisideStepFunction.html>
- Three ways to estimate remaining useful life for predictive maintenance. (s. f.). MATLAB & Simulink. <https://la.mathworks.com/company/newsletters/articles/three-ways-to-estimate-remaining-useful-life-for-predictive-maintenance.html>
- Stamatidis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from Theory to Execution*. Quality Press.
- Moubray, J. (2001). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press Inc.
- H, A. I. (2010). Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case study. Engineering, 02(11), 863-873. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.211109>
- UNICEF and the sustainable development goals. (s.f.). UNICEF. <https://www.unicef.org/sustainable-development-goals>

19. Anexo

19.1. Contexto motor 16V 2000 M-90 y contexto de operación

Motor utilizado por las lanchas del servicio general de la Armada de Chile.

- Cada lancha contiene 2 motores de esta variante.
- Hay 32 motores MTU M-90 en la Armada.
- Se utilizan 1000 horas al año aproximadamente
- Overhaul realizado cada 6000 horas.



Figura 18: Motor MTU, elaboración propia, 2023

Características	MTU 16V2000 M-90
Potencia max BHP	1636
MAX RPM	2300
Peso[kg] seco	3416
Consumo combustible MAX[lt/hr]	300

Cuadro 13: Tabla con características del motor MTU M-90, elaboración propia

19.2. Ejemplo entregable AMFEC, Cañería de alta presión de combustible

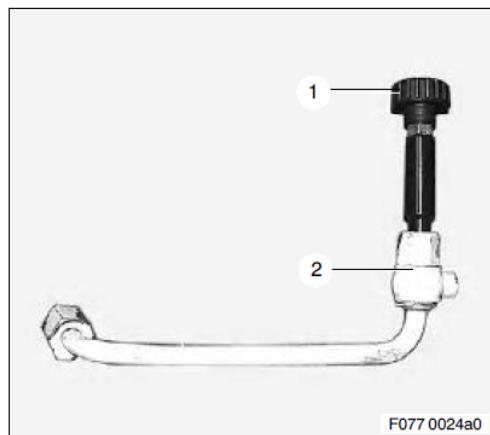


Figura 19: Cañería de alta presión de combustible, Fuente: Manual de mantenimiento MTU M-90

19.2.1. Diagrama de bloque

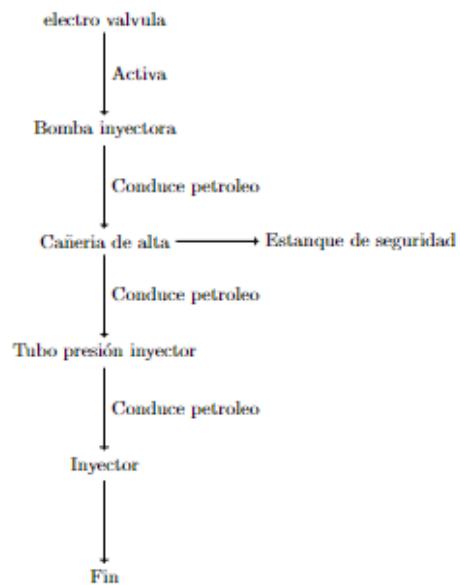


Figura 20: Diagrama de bloque. Elaboración propia, 2023

19.2.2. AMFE cañería de alta presión de combustible

numero	ítem	función
1	cañería de Alta presión de combustible	Transfiere combustible a alta presión desde la bomba inyectora hasta la tobera.

(a) Entregable AMFE parte 1

Modo falla potencia	efecto	S
Deformación, Perdida de concavidad	Combustible se filtra y cae dentro de estanque.	6
cavitación en la cañería interior	Combustible se filtra y cae dentro del estanque de acuso.	6

(b) Entregable AMFE parte 2

Causa	O	detección	D
Mal apriete, degradación del componente.	2	Sensor de fuga de combustible y visual.	2
cavitación debida a burbujas de oxígeno a alta presión.	1	Sensor de fuga de combustible y visual	4

(c) Entregable AMFE parte 3

IPR	cap. reparación
24	NO
24	

(d) Entregable AMFE parte 3.5

notas adicionales:
Al desmontar la pieza, existe la posibilidad de que el cono se deforme debido a un mal apriete de los operadores.

(e) Entregable AMFE parte 4

Figura 21: Ejemplo de entregable AMFE, Cañería de alta. Elaboración propia, 2023

19.2.3. Estimación ocurrencia

En el caso de las cañerías de alta presión de combustible, existen datos de fallas en la base de datos de la Armada de Chile, por lo tanto se puede determinar de manera cuantitativa. La información recopilada es entre el 2004-2023. Para estimar la ocurrencia se realizan los siguientes supuestos:

- Hay 512 cañerías de alta en operación todos los años
- El mantenimiento tipo overhaul es cada 6 años y se renuevan todas las cañerías
- Tasa de fallas constante
- Todos los overhauls se realizan el mismo año.

19.2.4. Tasa de fallas

La tasa de fallas se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda = 1/MTTF \quad (12)$$

Mean time to failure(MTTF) se calcula como:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (13)$$

donde T_i es el tiempo hasta la falla del componente i y n es el número total de componentes.

19.2.5. Probabilidad acumulada de fallas

La probabilidad acumulada de que falle el repuesto se expresa como: La probabilidad esperada (P_f) de que falle un repuesto en un intervalo de tiempo t se relaciona con la tasa de fallas (λ) mediante la siguiente ecuación:

$$P_f(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (14)$$

donde t es el tiempo y e es el numero de Euler.

19.2.6. Resultados estimación ocurrencia

El calculo da:

■

$$\lambda = 9,79 \times 10^{-7} \quad (15)$$

- MTTF = 1.020.666 Horas
- Probabilidad acumulada de que el componente falle a las 6000 horas:

$$P_f(6000) = 0,00587 \quad (16)$$

Esto según la tabla de ocurrencia (Véase la tabla 3) significa un valor igual a 2.

19.2.7. Función de confiabilidad

Se evalúa la función de confiabilidad del repuesto en operación, se concluye que, el repuesto tiene un 99 % de confiabilidad a las 12.000 horas de operación, es decir hay un 1 % de probabilidad de que falle si se reusa hasta el siguiente overhaul.

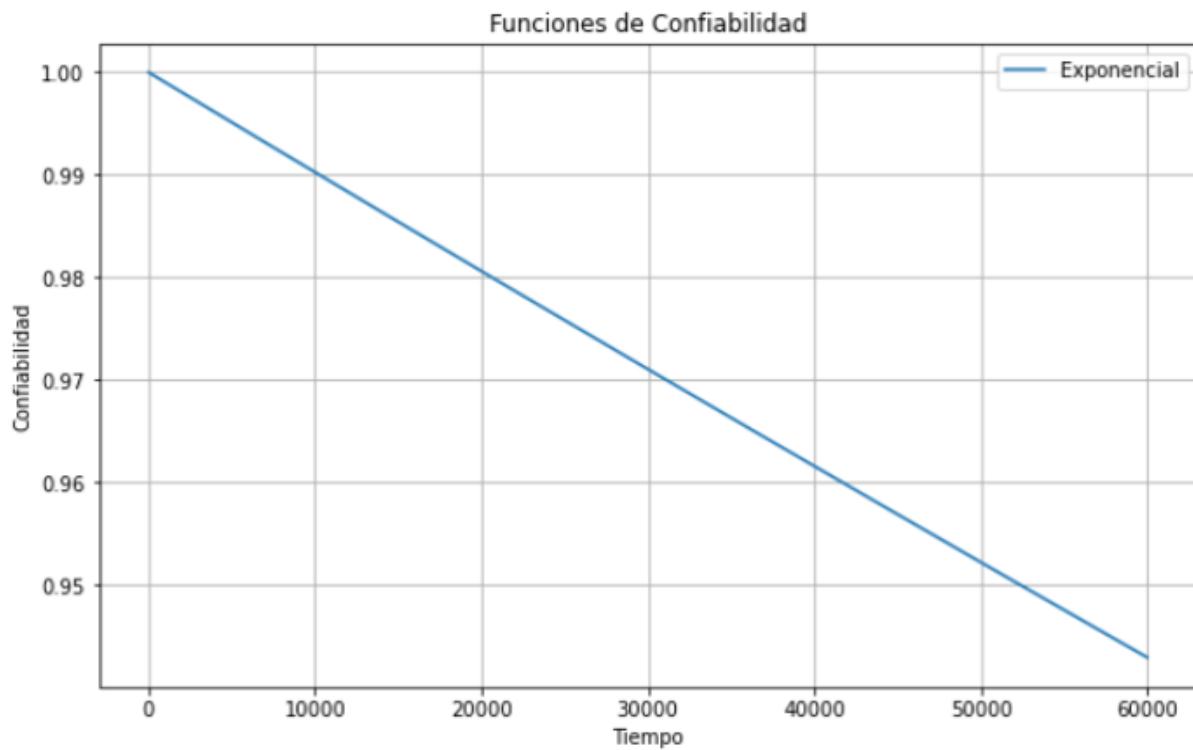


Figura 22: Función de confiabilidad cañería de alta, Fuente: Elaboración propia, 2023

19.3. Ejemplo árbol lógico de decisión RCM

A continuación, se presenta un árbol lógico de decisión RCM que se utilizó como referencia.

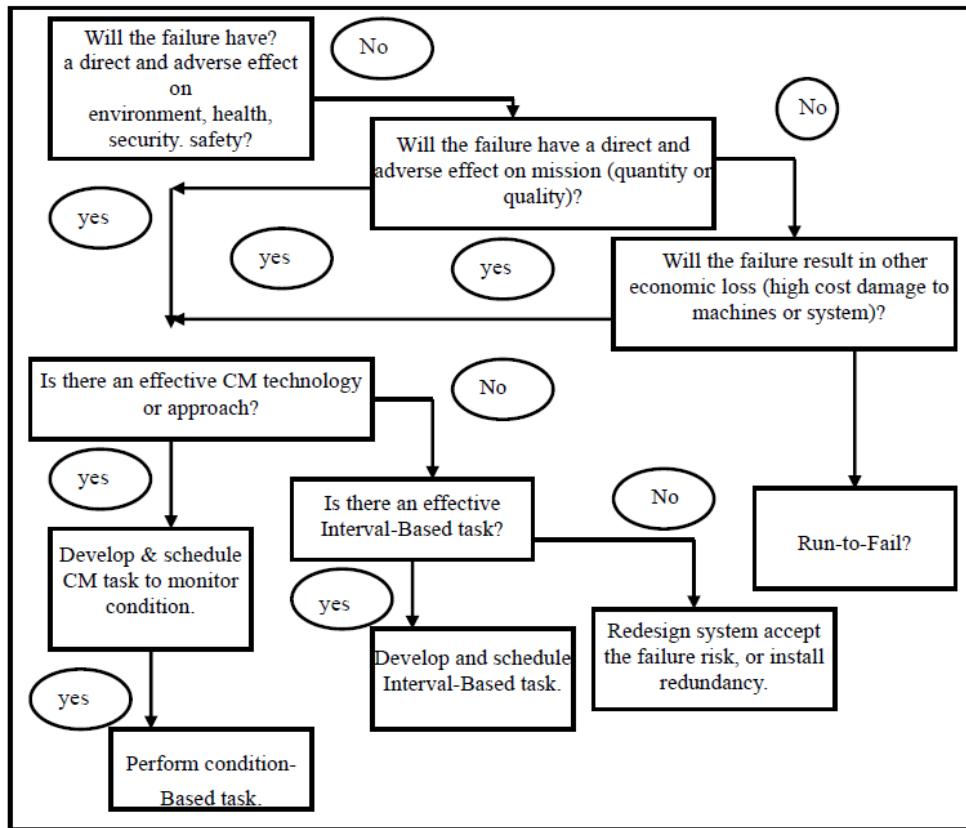


Figura 23: Diagrama lógico de decisión RCM. Fuente: (Afefy, 2010)

19.4. Cuadro de mantenimiento preventivo MTU M-90

A continuación, se presenta un cuadro de mantenimiento preventivo del motor MTU M-90, se utiliza en este proyecto para determinar el intervalo de inspección mas adecuado para los repuestos que lo requieran.

Item	Limit, years	Operating hours [h]																					
		Daily	250	500	750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750	3.000	3.250	3.500	3.750	4.000	4.250	4.500	4.750	5.000	5.250
Engine oil filter	2																						
Engine operation	-	X																					
Crankcase ventilation	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Crankcase ventilation	-		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Centrifugal oil filter	-		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Valve gear	-		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Fuel filter	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Pressure pipe neck (bayonet)	-												X										
Fuel injectors	-												X										
Combustion chambers	-													X									
Belt drive	2													X									
Air filters	3													X									
Fuel injection pumps	-																						
Component maintenance	-																						
Cylinder heads	-																						
Extended component maintenance	18																						
Fuel pressure maintaining valve	18																						

Figura 24: Cuadro mantenimiento preventivo. Fuente: (MTU, 2006)