

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE COSTOS DE
CICLO DE VIDA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN ASMAR VALPARAÍSO**

*Trabajo de Titulación para optar al Título
Ingeniería en mantenimiento Industrial.*

*Alumno:
Matías Camilo Cañas Méndez.*

*Profesor Guía:
Dr. Ing. Carlos Alberto Parra Márquez*

RESUMEN

KEYWORDS: ANÁLISIS COSTO CICLO DE VIDA, MANTENIMIENTO, COSTOS, PREDICTIVO, CONFIABILIDAD, WOODWARD.

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un procedimiento basado en el análisis de costos del ciclo de vida (ACCV) para la selección eficiente de equipos de mantenimiento predictivo en ASMAR Valparaíso, un astillero destacado en la industria naval Chilena. Fundada en 1960, ASMAR presta servicios de reparación, mantenimiento y construcción para la Armada de Chile, así como a clientes nacionales e internacionales. La organización enfrenta el desafío de invertir recursos a los talleres, donde cada uno debe justificar, técnica y económicamente, la adquisición de nuevos equipos. En este caso de estudio, nos enfocamos en el taller de control de calidad (C-366), una unidad crítica para garantizar la conformidad técnica y la satisfacción del cliente.

Actualmente, el taller opera con equipos desactualizados y discontinuados, lo que limita su capacidad para cumplir con las crecientes demandas operativas. A través de la implementación del modelo ACCV de John Woodward, esta tesis propone un procedimiento integral que combina aspectos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos, con un análisis técnico-económico riguroso. Este enfoque permite evaluar alternativas tecnológicas en equipos de vibraciones, ultrasonido, alineamiento láser y boroscopia, integrando los criterios operativos y financieros en un marco de toma de decisiones informado.

El procedimiento desarrollado no solo responde a las necesidades inmediatas del taller de control de calidad, sino que establece un estándar para futuras adquisiciones, facilitando la priorización de inversiones en el contexto del sistema de gestión integrado (SGI) de ASMAR. Los resultados obtenidos destacan la importancia de vincular las decisiones de inversión con un análisis detallado del ciclo de vida de los activos, lo que asegura una asignación óptima de recursos y un retorno de inversión maximizado.

Además, este trabajo pone de relieve la relevancia del taller de control de calidad como un componente estratégico dentro de la cadena de valor de ASMAR (V). Su fortalecimiento contribuye directamente a la sostenibilidad operativa y a la competitividad de la organización en un sector altamente exigente. Finalmente, la metodología propuesta promueve una gestión eficiente de los activos, fomenta la innovación tecnológica y refuerza el compromiso de ASMAR con la excelencia en la industria naval.

ÍNDICE

RESUMEN

SIGLA Y SIMBOLOGÍAS

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVO GENERAL 2

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS DEL CONTEXTO OPERACIONAL Y DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA EN LA SELECCIÓN DE EQUIPOS EN ASMAR 3

1.Definición del contexto operacional de la organización ASMAR Valparaíso 4

 1.1.Descripción general de la organización ASMAR (V) 4

 1.1.1.Ubicación de la organización 4

 1.1.2.Actividades de ASMAR (V) 5

 1.1.3.Misión 5

 1.1.4.Visión 5

 1.2.Mapeo de los macroprocesos de ASMAR (V) 6

 1.3.Organigrama general de la organización ASMAR (V) 10

 1.3.1.Subgerencia de producción C-300 11

 1.3.2.Departamento de mecánica C-360 12

 1.4.Gestión del cambio en ASMAR 13

 1.5.Distribución de los recursos para los departamentos 14

 1.6Análisis de problemáticas. 15

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE COSTOS DE CICLO DE VIDA (ACCV) BASADO EN EL MODELO DE WOODWARD 20

2.Procedimiento ACCV basado en el modelo Woodward.....21

 2.1Antecedentes del modelo de Woodward 21

 2.2. Conceptos fundamentales para el procedimiento ACCV 23

 2.3. Proceso de aplicación de técnica de ACCV.....29

 2.4. Evaluación del impacto de la confiabilidad en el modelo ACCV 30

 2.5. Modelo de ACCV de Woodward.....31

 2.5.1.Procedimiento del ACCV basado en el modelo de Woodward 33

CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ACCV PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN ASMAR (V) 39

3.Implementación del ACCV en las tecnologías de mantenimiento predictivo de ASMAR (V)40

3.1. A - Evaluación del ACCV para los equipos de análisis de vibraciones 41

3.1.1.Procedimiento 41

3.2. B- Evaluación del ACCV para los equipos de ultrasonido.....46

3.2.1.Procedimiento 46

3.3. C- Evaluación de ACCV para los equipos de boroscopia industrial 52

3.3.1.Procedimiento 52

3.4. D - Evaluación del ACCV para equipos alineamiento láser.....59

3.4.1.Procedimiento 59

3.5. Análisis de los equipos de mantenimiento predictivo evaluados 66

3.5.1.Resumen final de la evaluación de los equipos de mantenimiento predictivo.....67

CONCLUSIÓN.....69

BIBLIOGRAFÍA.....71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Vista general de las tres instalaciones de ASMAR. 5

Figura 2-1: Modelo de gestión de mantenimiento integrado a la ISO 55000 22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Distribución de recursos a los talleres del C-360. 15

Tabla 1-2: FMEA de un motor PAXMAN. 19

Tabla 1-3: Equipos de mantenimiento predictivo dados de baja. 19

Tabla 3-1: Orden de evaluación de los equipos de mantenimiento predictivo. 40

Tabla 3-3: Categoría de costos del equipo de vibraciones Falcon WLS Pack.....42

Tabla 3-5: Tabla de Costos por confiabilidad del equipo Falcon WLS PACK. 43

Tabla 3-6: Costos por confiabilidad del equipo de vibraciones SKF CMV90. 44

Tabla 3-7: Costos de valor presente de los fallos de la opción N°1 y N°2.	45
Tabla 3-8: ACCV de los equipos de vibraciones de la opción N°1 y N°2.	46
Tabla 3-9: Equipos de ultrasonido.	47
Tabla 3-10: Categoría de costos del equipo ultrasonido DMS GO.....	48
Tabla 3-11: Categoría de costos del equipo ultrasonido Microlog CMV90.	48
Tabla 3-12: Costos por confiabilidad del equipo de ultrasonido DMS GO.....	49
Tabla 3-13: Costos por confiabilidad del equipo de ultrasonido KT-310.....	50
Tabla 3-14: Costos de valor presente de los fallos de la opción N°1 y N°2.	51
Tabla 3-15: ACCV de los Equipos de ultrasonido.....	52
Tabla 3-16: Equipos de boroscopia.....	53
Tabla 3-17: Categoría de costos del equipo Boroscopio Olympus RX4.	54
Tabla 3-18: Categoría de costos del equipo Boroscopio SVG C-19.....	54
Tabla 3-19: Costos por confiabilidad del equipo de boroscopia Olympus RX4.	55
Tabla 3-20: Categoría de costos del equipo Boroscopio SVG-C19.....	56
Tabla 3-21: Costos de valor presente de los fallos de la opción N°1 y N°2.	57
Tabla 3-22: ACCV de los equipos de boroscopia.....	58
Tabla 3-23: Equipos de alineamiento láser.	60
Tabla 3-24: Categoría de costos del equipo alineamiento láser XT660SD.	60
Tabla 3-25: Categoría de costos del equipo alineamiento Fixturlaser NXA.	61
Tabla 3-26: Costos por confiabilidad del equipo de alineamiento láser XT660SD.....	62
Tabla 3-27: Categoría de costos por confiabilidad del equipo Fixturlaser NXA.....	63
Tabla 3-28: Costos de valor presente de los fallos de la opción N°1 y N°2.	64
Tabla 3-29: ACCV de los equipos alineamiento laser.....	65
Tabla 3-30: Resumen ACCV evaluados.	66

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1-1: Vista general de los macroprocesos de ASMAR (V).	6
Diagrama 1-2: Estructura organizativa ASMAR (V).....	10
Diagrama 1-3: Diagrama organizacional de la subgerencia de producción C-300.....	12
Diagrama 2-1: Desglose de actividades más usuales para la identificación de costos. ...	24
Diagrama 2-2: Diagrama de proceso de gestión de residuos.	27
Diagrama 2-3: Modelo de ACCV de Woodward.....	34

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1: Creación de valor en fases tempranas en la categoría de costos. 25

Gráfico 2-1: Imagen representativa de los costos CAPEX-OPEX. 28

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Tiempo promedio entre fallo.....31

Ecuación 2.2: Tiempo promedio de reparación. 31

Ecuación 2.3: Costos totales del ciclo de vida del equipo a evaluar en valor presente basado en el modelo de Woodward. 35

Ecuación 2.4: Frecuencia de fallos. 37

Ecuación 2.5: Costos de cada tipo de falla.....37

Ecuación 2.6: Tiempo promedio de reparación. 38

Ecuación 2.7: Costos totales por fallos en valor presente. 38

SIGLA Y SIMBOLOGÍAS

SIGLAS

- ACCV :Análisis costos de ciclo de vida
- ASMAR: Astilleros y Maestranzas de la Armada
- FMEA :Análisis de modos de fallos y efectos
- RCM :Mantenimiento centrado en confiabilidad
- TFS :Tiempo fuera de servicio
- MTTF :Mean time to failure (tiempo promedio operativo hasta el fallo)
- MTTR :Mean time to repair (tiempo promedio de reparación)
- MTBF :Mean Time Between Failures (Tiempo promedio entre fallos)
- SGI :Sistema de gestión integrado.

SIMBOLOGÍAS

CTCV :Costos totales de ciclo de vida llevados a valor presente.

CI :Costos iniciales de adquisición e instalación.

CO :Costos operacionales.

CMP Costos de mantenimiento preventivo.

CMM :Costos de mantenimiento mayor.

TPCf :Costos totales por confiabilidad.

VR :Valor de reposición.

δf :Número total de fallos al año.

N :Número total de fallos al año.

T :Número total esperado de años de vida útil.

Cf :Costos de cada fallo.

MTTR :Tiempo promedio para reparar cada fallo.

Cpef :Costos de penalización por hora.

TCPf :Costo total por fallas.

Cf :Costos de cada fallo (\$).

PTCPf :Costos totales por fallo.

T :Vida útil esperada.

I :Tasa de descuento.

To :Tiempo operativo.

FC : formato de trabajo

T : instrucción de trabajo

PD : Procedimiento

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la industria naval Chilena, ASMAR (Astilleros y Maestranza de la Armada) destaca como una organización estratégica dedicada a la reparación, construcción y mantenimiento de embarcaciones, tanto para la Armada de Chile como para clientes nacionales e internacionales. ASMAR cuenta con instalaciones en Talcahuano, Valparaíso y Magallanes, cada una especializada en distintos aspectos de la industria naval. Dentro de estas operaciones, el taller de control de calidad (C-366) desempeña un rol crítico en la verificación técnica de los trabajos realizados, asegurando la conformidad con los estándares establecidos y la satisfacción del cliente.

El taller enfrenta desafíos significativos que comprometen su operatividad. Los equipos disponibles actualmente están obsoletos, descalibrados y descontinuados, lo que limita su capacidad para atender las crecientes exigencias operativas. A esta problemática se suma la falta de una metodología estandarizada que permita justificar, de manera técnica y económica, las inversiones de nuevos equipos. Como resultado, el taller ha sido considerado a una posición de baja prioridad dentro de la organización. Esta situación subraya la necesidad de implementar un enfoque integral que no solo optimice las decisiones de inversión, sino que también refuerce la relevancia estratégica del taller en el contexto de ASMAR. Esta tesis propone el desarrollo y evaluación del procedimiento de análisis de costos del ciclo de vida (ACCV) basado en el modelo de Woodward. Este modelo combina aspectos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos con un análisis técnico-económico, proporcionando un marco para evaluar las alternativas tecnológicas en equipos de mantenimiento predictivo. El objetivo principal de este procedimiento es garantizar la selección de activos que maximicen la eficiencia de inversión, alineándose con los objetivos operativos y estratégicos de la organización.

El presente trabajo se estructura en tres capítulos principales. En el primer capítulo, se define el contexto operacional de ASMAR y se establecerán los fundamentos de la problemática permitiendo reconocer el análisis costos de ciclo de vida como una oportunidad de mejora. En el segundo capítulo se explicará el procedimiento de ACCV basado en el modelo de Woodward, adaptándolo a las necesidades específicas del taller de control de calidad (C-366). Finalmente, el tercer capítulo, se aplicará este procedimiento en la evaluación de cuatro tecnologías clave de mantenimiento predictivo, demostrando su utilidad práctica y su impacto positivo en la toma de decisiones y la forma de justificación.

Con esta propuesta, la tesis busca posicionar al taller de control de calidad como un componente estratégico en la cadena de valor de ASMAR, promoviendo una gestión eficiente de los activos, fomentando la innovación tecnológica y reforzando el compromiso de la organización con la excelencia en la industria naval.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el procedimiento de análisis de costos de ciclo de vida (ACCV) para optimizar la selección de tecnologías predictivas en ASMAR Valparaíso.

Para el logro de este propósito, se proponen los siguientes objetivos específicos:

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el contexto operacional de ASMAR Valparaíso para definir la problemática en la selección de los equipos existentes.
- Explicar el procedimiento de análisis de costos de ciclo de vida (ACCV), basado en el modelo de Woodward, para ser adaptado a las tecnologías del taller de control de calidad.
- Implementar el procedimiento análisis costo de ciclo de vida (ACCV) para justificar la mejor alternativa de las cuatro tecnologías del mantenimiento predictivo utilizadas por el taller de control de calidad de ASMAR Valparaíso.

**CAPÍTULO 1: ANÁLISIS DEL CONTEXTO OPERACIONAL Y DEFINICIÓN
DE LA PROBLEMÁTICA EN LA SELECCIÓN DE EQUIPOS EN ASMAR**

1. DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL DE LA ORGANIZACIÓN ASMAR VALPARAÍSO

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ORGANIZACIÓN ASMAR (V)

Astilleros y Maestranza de la Armada (ASMAR), es una organización del Estado con administración autónoma, patrimonio propio y de derecho público regida por la ley N°18.296 “Ley orgánica de los Astilleros y Maestranzas de la Armada”. Fue fundada el 06 de abril de 1960 con el fin de atender las reparaciones, mantenciones y construcciones de la Armada de Chile y extranjeras.

1.1.1. Ubicación de la organización

Actualmente, ASMAR cuenta con tres instalaciones ubicadas en diferentes regiones de Chile, lo que ha permitido llevar a cabo las distintas operaciones de construcción, mantenimiento y reparación de embarcaciones a lo largo del territorio. Estas instalaciones son (Ver Figura 1-1):

ASMAR TALCAHUANO “ASMAR(T)”: Está ubicado en la ciudad de Talcahuano, en la región del Biobío, es el astillero con las instalaciones más grandes de ASMAR y el principal centro de operaciones de la empresa. Acá se realizan la mayoría de las reparaciones y construcciones navales, incluyendo los proyectos más importantes, como la construcción de buques y submarinos, siendo el centro de mayor importancia para la industria naval Chilena debido a su infraestructura y su capacidad operacional.

ASMAR VALPARAÍSO “ASMAR (V)”: Situado en la ciudad de Valparaíso, región de Valparaíso, este centro se especializa en reparaciones navales e industriales a clientes nacionales o terceros. También se dedica a realizar trabajos de mantenimiento y fabricación de embarcaciones menores.

ASMAR MAGALLANES “ASMAR (M)”: Se encuentra ubicado en Punta Arenas, en la región de Magallanes y la Antártica Chilena. Este astillero se especializa en atender a embarcaciones que operan en condiciones extremas o naves que hacen ruta hacia la Antártica, enfocándose principalmente en reparaciones y mantenimiento de barcos que requieran servicios en zonas cercanas a la región.



Fuente: www.ASMAR.cl

Figura 1-1: Vista general de las tres instalaciones de ASMAR.

1.1.2. Actividades de ASMAR (V)

ASMAR Valparaíso, posee una gran variedad de capacidades técnicas, especializadas en el área de la mecánica, electricidad, electrónica, metalurgia, aislación térmica, diagnóstico de fallas, hidráulica, neumática, combustión interna e ingeniería.

El principal enfoque de trabajo, debido a su infraestructura y capacidad humana, está orientado al mantenimiento a flote de la escuadra situada en la costa de Valparaíso. Aquí se realizan reparaciones de casco de buque (carenas) y reparaciones a naves menores, así como trabajos para otras reparticiones terrestres de la zona norte y centro del país. En el ámbito de la construcción menor, ASMAR (V) tiene la capacidad para construir botes neumáticos y semirrígidos bajo la marca PUMAR, logrando realizar mantenciones y reparaciones a terceros, tanto nacionales como a extranjeros.

1.1.3. Misión

La misión principal de ASMAR (V) es satisfacer eficientemente las necesidades de reparaciones, carenas y construcciones de la Armada de Chile, pudiendo, con su capacidad, atender las reparaciones y mantenciones de naves nacionales, extranjeras y plantas industriales ubicadas en el territorio nacional.

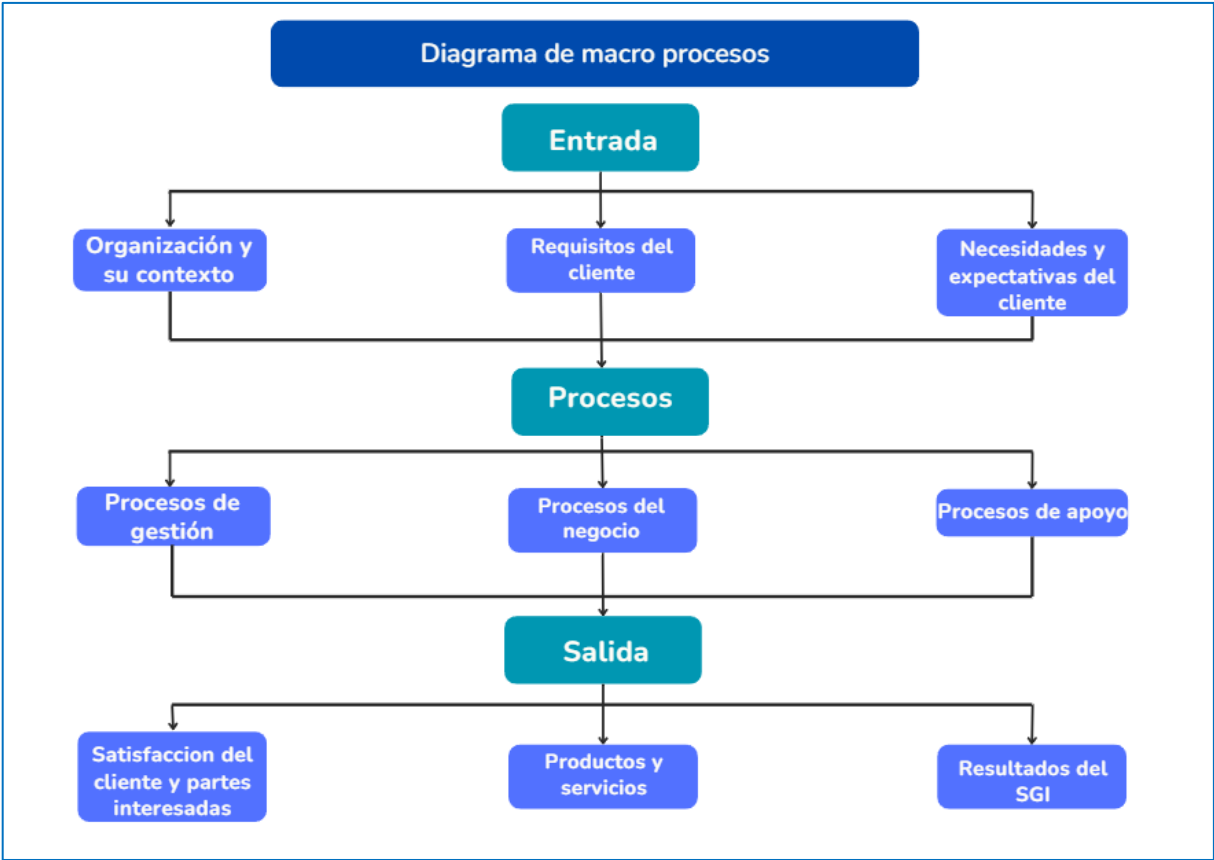
1.1.4. Visión

Ser una empresa estratégica del estado de Chile, líder y referente en el ámbito de la industria naval y de la defensa nacional, logrando asegurar todas las capacidades necesarias para la Armada de Chile, permitiendo el sostenimiento de su flota y la construcción de buques. Posicionándose, además, como la mejor alternativa a nivel de Latinoamérica en el área de reparaciones navales, siendo reconocida por la calidad, orientación al cliente y profesionalismo en sus procesos.

1.2. MAPEO DE LOS MACROPROCESOS DE ASMAR (V)

Los macroprocesos de ASMAR Valparaíso, representan el diseño para garantizar una integración efectiva entre las áreas de negocio, gestión y soporte, dentro de un marco orientado a la eficiencia operativa. Este enfoque permite que las distintas áreas productivas y administrativas trabajen de manera coordinada, alineándose con los objetivos estratégicos de la organización. La coordinación se logra a través de la implementación del Sistema de Gestión Integrado (SGI), que establece lineamientos claros para optimizar la interacción entre procesos y asegurar un desempeño coherente con las metas organizacionales.

En el siguiente diagrama, se presentan los macroprocesos generales de ASMAR Valparaíso, donde se detalla cómo se organizan y se interrelacionan para sustentar las actividades operativas y administrativas de la organización. Este enfoque estructurado busca mejorar la eficiencia operativa, permitiendo que las diversas áreas productivas y administrativas trabajen de manera coordinada y alineada con los objetivos estratégicos de la organización (Ver Diagrama 1-1).



Fuente: Elaboración propia, en base a los macroprocesos de ASMAR (V)

Diagrama 1-1: Vista general de los macroprocesos de ASMAR (V).

A continuación, se describirán de manera general los recuadros individuales de los macroprocesos. Este análisis permitirá contextualizar el entorno operativo y administrativo de ASMAR Valparaíso. En ellos encontramos los siguientes:

A. Procesos de entrada:

Para comenzar, se describen los procesos de entrada, que abarcan las siguientes áreas fundamentales:

- a) Procesos de entrada: Esta sección presenta la misión y visión de la empresa, las cuales definen los lineamientos estratégicos y las partes interesadas, tanto internas como externas:
 - Partes externas: Incluyen a los clientes de la Armada, empresas industriales y marítimas, entidades gubernamentales, proveedores, contratistas, organismos reguladores estatales, la comunidad local y competidores en los segmentos de negocio relevantes.
 - Partes internas: Corresponden a los trabajadores de ASMAR, sindicatos, estudiantes en práctica y la dirección de la empresa.
- b) Requisitos del cliente: Los clientes requieren de capacidades técnicas, humanas y de infraestructura de la empresa para realizar mantenimientos, construcción de botes PUMAR, reparaciones de naves, proyectos de ingeniería y la reparación de equipos terrestres.
- c) Necesidades y expectativas de las partes interesadas: De acuerdo con el tipo de parte interesada, la organización debe atender los siguientes aspectos:
 - De las partes interesadas externas: Se deberá hacer cumplir los contratos, garantizar la recepción de los trabajos con total satisfacción en el plazo y calidad establecidos, además de contar con disponibilidad permanente de especialistas, quienes deberán cumplir con las normas laborales, ambientales y de seguridad en el trabajo, así como con los procedimientos establecidos por ASMAR
 - De partes las interesadas internas: Se debe garantizar estabilidad laboral, un clima organizacional adecuado, remuneraciones justas, oportunidades de desarrollo profesional, maximización de beneficios económicos y sociales, y cumplimiento de objetivos estratégicos y de calidad

B. Procesos de gestión:

En los procesos de gestión se integran varios aspectos fundamentales, los cuales permiten a la organización tomar las mejores decisiones en el ámbito de planificación, control y coordinación para alcanzar los objetivos estratégicos. Estos procesos se dividen en las siguientes áreas:

- a) Gestión de riesgo y oportunidades: Enfocada en identificar y evaluar los riesgos que puedan afectar los objetivos de la organización, así como en aprovechar oportunidades de mejora
- b) Gestión del cambio: Involucra aspectos de planificación, implementación y control, garantizando que los cambios se realicen según lo planificado sin afectar los procesos operacionales.
- c) Evaluación de requisitos: Se definen y revisan los requisitos legales, regulatorios y de los clientes para garantizar el cumplimiento de los estándares identificados.
- d) Auditorías: Se realizan evaluaciones para detectar la conformidad de los procesos e identificar las áreas de mejora para asegurar la calidad.
- e) Análisis de no conformidades: Se evalúan y corrigen todos los problemas relacionados al incumplimiento de los estándares impuestos por ASMAR.
- f) Planificación del Sistema de Gestión Integrado (SGI): Se asegura una planificación adecuada y el alineamiento de los objetivos estratégicos para maximizar el uso eficiente de los recursos disponibles.
- g) Mejoras de servicio y producto: Se identifican y aplican mejoras continuas para incrementar el valor, la calidad y la competitividad de los servicios entregados por la organización
- h) Revisión gerencial: Se realizan evaluaciones periódicas, en las que los encargados de la gerencia analizan las áreas de mejora y garantizan que el proceso organizacional se desarrolle según la dirección planificada

C. Procesos del negocio:

Los procesos del negocio abarcan actividades clave para la generación de valor en ASMAR Valparaíso, estructurando en las siguientes áreas:

- a) Ventas: Se identifican cuatro tipos principales de ventas que representan los enfoques estratégicos de la organización: ventas a la Armada, ventas marítimas, ventas industriales y ventas PUMAR. Cada una de estas áreas responde a necesidades específicas del mercado y refuerza la posición competitiva de ASMAR en diferentes segmentos.

- b) Estimación: Este proceso implica analizar los requerimientos del cliente junto con la normativa legal vigente y los estándares operativos de la planta. Como resultado, se genera una estimación valorada que permite presentar una cotización adecuada y competitiva.
- c) Planificación y programación: Se lideran actividades relacionadas con la ingeniería de procesos y la programación de los trabajos, asegurando el cumplimiento de la planificación estratégica. Este proceso incluye el desarrollo de planes, regulaciones y proyectos, orientados a alcanzar los objetivos organizacionales.
- d) Producción: En esta etapa, se gestionan y planifican eficientemente los requerimientos entregados por la subgerencia comercial. Esto permite administrar de manera óptima los recursos de la empresa, promoviendo la innovación y optimización de los procesos productivos para mantener y fortalecer las ventajas competitivas
- e) Subcontratos: Esta área se encarga de gestionar y contratar servicios externos que apoyen los procesos productivos, de mantenimiento e inversiones. La administración de empresas contratistas busca optimizar la utilización de los recursos, asegurando un soporte eficiente para las operaciones principales.

D. Procesos de apoyo

ASMAR Valparaíso cuenta con tres áreas principales que respaldan los procesos del negocio, proporcionando soporte estratégico y operacional:

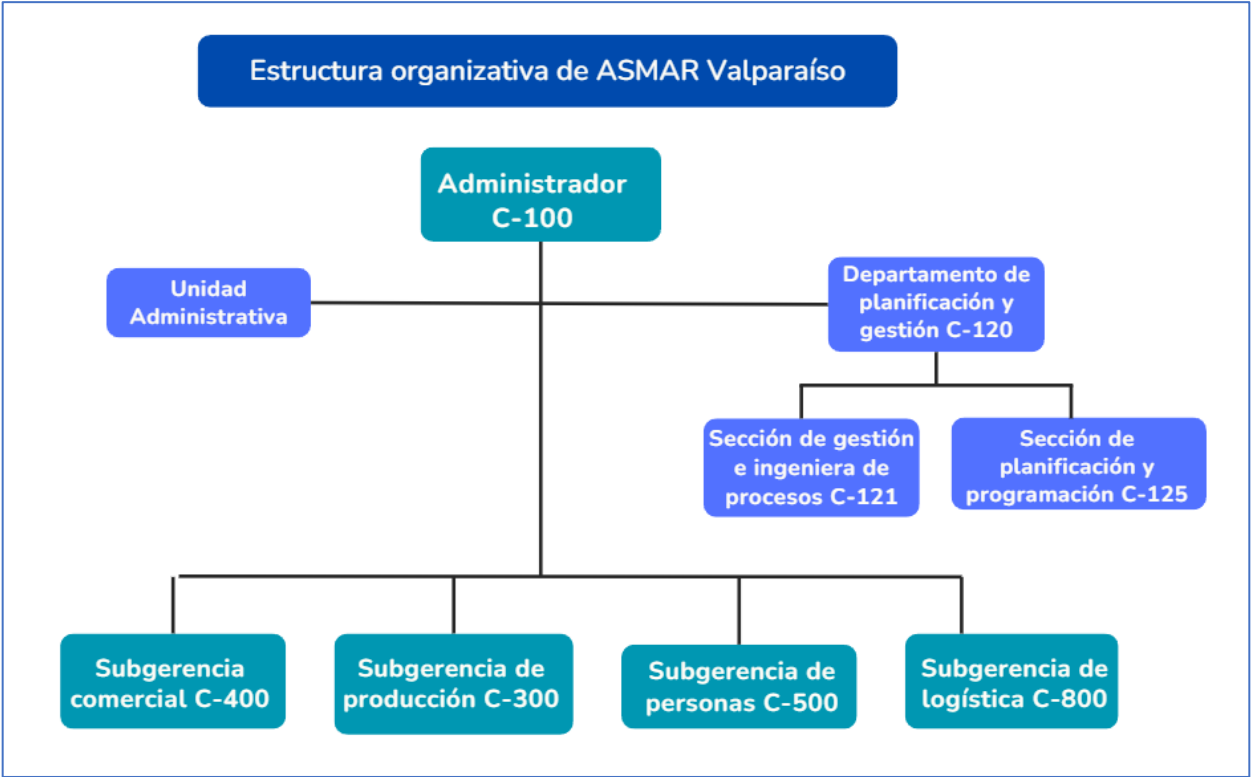
- Apoyos logísticos: Incluye abastecimiento, adquisiciones, subcontratos, mantenimiento, movilización de personal e informática.
- Planificación y control de gestión: Se alimenta de áreas de planificación estratégica, control y gestión, e ingeniería de procesos.
- Gestión de recursos humanos: Relacionado con la capacitación del personal, remuneraciones, bienestar, relaciones laborales, contratación, y cumplimiento de normas de prevención y medio ambiente.

E. Salida

Todos los indicadores claves que miden las satisfacciones al cliente permiten dar aviso para gestionar el éxito o incumplimiento de los objetivos estratégicos. Esta área de la empresa es de vital importancia porque representa la efectividad de la organización en responder a sus clientes y partes interesadas. Todos los servicios entregados por ASMAR (V), deben representar resultados visibles y directos, cumpliendo con los estándares de calidad , innovación y mejora continua.

1.3. ORGANIGRAMA GENERAL DE LA ORGANIZACIÓN ASMAR (V)

ASMAR (V) cuenta con una estructura organizativa que le permite distribuir todos los procesos y funciones para poder optimizar el uso de sus activos. A continuación, se presenta el diagrama que representa la estructura general organizativa (Ver Diagrama 1-2).



Fuente: Elaboración propia, en base a la estructura organizativa de ASMAR (V).

Diagrama 1-2: Estructura organizativa ASMAR (V).

El diagrama anterior presenta una vista general, destacando cómo cada área contribuye al cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización, donde se identifican los siguientes bloques:

En la parte superior, la Administración (C-100) lidera la gestión estratégica y operativa, supervisando tanto las unidades administrativas como los servicios compartidos. Este nivel incluye el Departamento de Planificación y Gestión (C-120), encargado de asesorar en áreas presupuestarias y contables, así como liderar la planificación estratégica. Dentro de este departamento, las secciones de Gestión e Ingeniería de Procesos (C-121) y Programación y Planificación (C-125) desempeñan

funciones específicas relacionadas con la supervisión de objetivos y la planificación de proyectos.

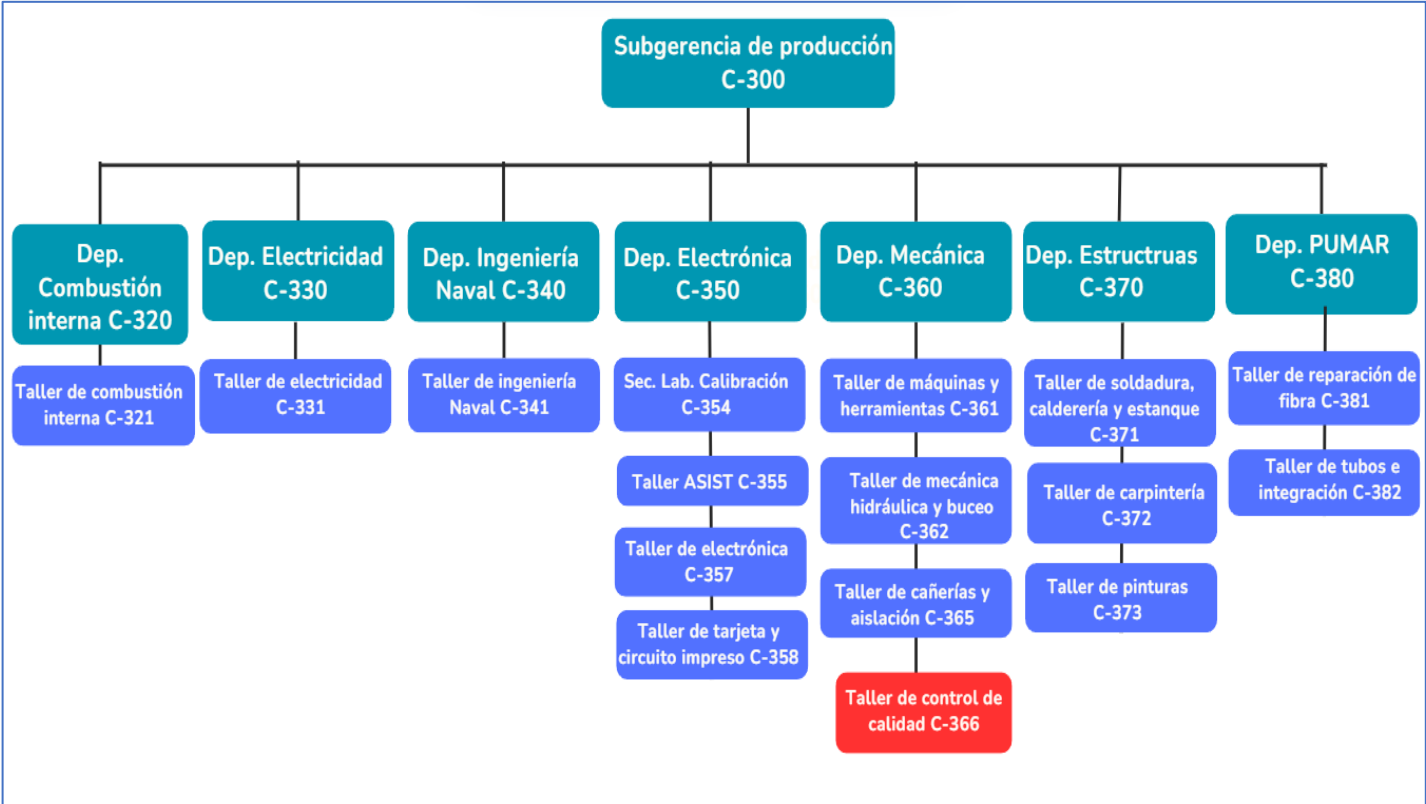
En niveles inferiores, las subgerencias cumplen roles especializados:

- La Subgerencia Comercial (C-400) establece y ejecuta planes de ventas, garantizando el cumplimiento de los objetivos operativos anuales.
- La Subgerencia de Personas (C-500) se enfoca en la gestión estratégica de los recursos humanos, promoviendo el bienestar laboral y el desarrollo profesional.
- La Subgerencia de Logística (C-800) coordina recursos y operaciones logísticas, asegurando el soporte necesario para las actividades productivas.
- Finalmente, la Subgerencia de Producción (C-300) planifica y gestiona los recursos productivos, con un enfoque en plazos, costos y calidad. Dentro de esta subgerencia, destaca el Departamento de Mecánica (C-360), el cual se explicará a continuación

1.3.1. Subgerencia de producción C-300

La Subgerencia de Producción (C-300) se encarga de la planificación y gestión de los recursos relacionados con los aspectos productivos, incluyendo plazos, costos y calidad. Su objetivo es cumplir con los requerimientos de la Subgerencia Comercial (C-400), asegurando el cumplimiento de las metas organizacionales. El área cuenta con el apoyo técnico del Centro de Ingenieros de Proyectos y Sistemas (C-301), que brinda supervisión general y específica para los proyectos asignados a la planta.

Esta subgerencia abarca siete departamentos, los cuales integran talleres clave en la cadena de producción de ASMAR Valparaíso. Entre ellos, destaca el Departamento de Mecánica (C-360), que incluye al Taller de Control de Calidad (C-366). Este taller juega un papel esencial en el proceso productivo, ya que certifica los trabajos realizados por los demás talleres, garantizando el cumplimiento de los estándares técnicos, normativos y de calidad establecidos por la organización (Ver Diagrama 1-3).



Fuente: Elaboración propia, en base a información de ASMAR(V)

Diagrama 1-3: Diagrama organizacional de la subgerencia de producción C-300.

1.3.2. Departamento de mecánica C-360

El departamento de mecánica, de manera similar a los otros departamentos, se encarga de la gestión y administración de los recursos para su área. Dirige y controla los trabajos asignados, brindando asesoramiento y soporte en las operaciones de los talleres a su cargo, permitiendo optimizar la calidad de los trabajos. Este departamento está a cargo de siguientes talleres:

- a) Taller de máquinas y herramientas C-361: En este taller se realizan trabajos de fabricación (mecanizado y torneado), permitiendo hacer la reparación de partes y piezas efectuando trabajos de apoyo para otros talleres.
- b) Taller de mecánica e hidráulica y buceo C-362: Se realizan trabajos de desmonte, desarme, inspección, calibración, reparación, limpieza, armado, pruebas e instalaciones de equipos y sistemas mecánicos e hidráulicos. Los trabajos de mantenimiento incluyen una amplia gama de actividades correctivas y preventivas asociadas.

- c) Taller de cañerías y aislación C-365: Se ejecutan trabajos de montaje y desmontaje de aislamiento térmico, fabricación de ductos y conformado de cañerías para diferentes circuitos solicitados.
- d) Taller de control de calidad C-366: Se realizan una variedad de trabajos que permiten dar la aceptación de los trabajos realizados por los demás talleres, así como actividades líderes que se deben ejecutar, tales como: ensayos no destructivos, balanceo dinámico, alineamiento, mantenimientos predictivos, fabricación de croquis, dimensionales y ajustes de componentes mecánicos. Todos estos trabajos deben ser certificados por los inspectores de control de calidad.

La Subgerencia de Producción es fundamental para asegurar la calidad y la eficiencia en los procesos operativos de ASMAR Valparaíso. Dentro de sus departamentos, el Taller de Control de Calidad (C-366), cumple un rol importante en la certificación de los trabajos realizados, contribuyendo directamente al desarrollo y la excelencia de los servicios ofrecidos por la organización. Este taller representa una oportunidad estratégica para implementar un procedimiento basado en el Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV), lo que permitiría optimizar la gestión de recursos y fomentar la mejora continua en sus operaciones.

1.4. GESTIÓN DEL CAMBIO EN ASMAR

La gestión del cambio es un factor esencial de los procesos de gestión en ASMAR, orientada a fomentar la mejora continua y la adaptación de los procesos operativos a las necesidades estratégicas de la organización. Esta gestión se encuentra identificada en el procedimiento interno número (DO-6-02), que define las instancias de cambio como herramientas clave para asegurar que los procesos se mantengan actualizados y alineados con los objetivos del Sistema de Gestión Integrado (SGI).

El procedimiento establece que cualquier cambio significativo, como la adquisición de nuevos activos o la ejecución de proyectos innovadores, debe ser cuidadosamente planificado y deliberado, dado su potencial impacto en la estructura organizacional. En el caso del taller de control de calidad (C-366), la adquisición de equipos críticos de mantenimiento predictivo representa un cambio estratégico que requiere priorización y análisis dentro de estas instancias de cambio.

En el contexto de esta tesis, el procedimiento de Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV) se presenta como una herramienta que puede fortalecer las decisiones del comité de inversiones, proporcionando justificaciones basadas en análisis técnico-económicos. Este enfoque asegura que las inversiones en equipos críticos del taller (C-

366) sean priorizadas de manera efectiva, optimizando los recursos disponibles y promoviendo la sostenibilidad operativa de la organización.

Los cambios que se aborden deberán quedar registrados en un formulario interno designado con el código, (FC 2/D0-6-03 “Plan de oportunidad XX”) [1], para posteriormente poder llevar a cabo su revisión.

1.5. DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS PARA LOS DEPARTAMENTOS

En el marco de las directrices del departamento de producción (C-360), se ha realizado una asignación de recursos destinada a fortalecer las capacidades productivas de los talleres. Esta asignación se divide en los siguientes objetivos:

- a) Mejorar la capacidad y los procesos operativos.
- b) Renovar equipos críticos.
- c) Mantener las capacidades vigentes.

En la tabla siguiente, se detalla la distribución de recursos asignados a cada taller del centro (C-360). De esta, destaca el taller de control de calidad (C-366), que recibió una asignación estimada de \$190.993.573 (Ver Tabla 1-1). Este presupuesto, superior al de otros talleres, refleja la necesidad urgente de actualizar los equipos de mantenimiento predictivo y adquirir nuevos para el año 2025. Entre estos equipos se encuentran dispositivos de vibraciones, de alineamiento, ultrasonido y boroscopia.

Este trabajo introduce un procedimiento basado en el análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV) para evaluar la viabilidad económica y técnica de estas inversiones. Este enfoque busca optimizar la toma de decisiones, maximizando el retorno de inversión y garantizando que las adquisiciones estén alineadas con las necesidades operativas del taller. La asignación de recursos para control de calidad (C-366), permitirá:

- a) Incrementar la capacidad técnica del taller.
- b) Mejorar los procesos de mantenimiento predictivo.
- c) Garantizar la sostenibilidad operativa de la planta.

Esta distribución de recursos refuerza el compromiso de ASMAR con la mejora continua y la sostenibilidad de sus operaciones. Al aplicar un modelo de análisis técnico-económico como el ACCV, se asegura que las inversiones en equipos críticos no solo cumplan con las necesidades actuales, sino que también promuevan una gestión eficiente de los recursos a largo plazo.

Tabla 1-1: Distribución de recursos a los talleres del C-360.

Talleres	Distribución de recursos por objetivos de inversión / Estimado			Total
	Mejoramiento capacidad y procesos	Renovación de equipos	Mantener capacidad vigente	
C-361	\$ 3.511.214	-	\$9.664.228	\$ 13.175.442
C-362	-	-	-	-
C-365	\$ 4.034.100	\$ 20.604.691	-	\$24.638.791
C-366	-	\$190.993.573	-	\$190.993.573

Fuente: Elaboración propia, en base a información interna de ASMAR(V)

1.6. ANÁLISIS DE PROBLEMÁTICAS

De acuerdo con la información recopilada, la estructura de ASMAR Valparaíso abarca diversas áreas dedicadas al mantenimiento predictivo de equipos y proyectos de ingeniería. Entre estas, el Taller de Control de Calidad (C-366) se destaca como una unidad crítica encargada de certificar los trabajos internos y externos realizados por los talleres de producción. Este proceso asegura que los niveles de calidad cumplan con los estándares establecidos y sean aceptados dentro del sistema de control interno.

El área de producción (C-300) juega un papel clave, ya que concentra la mayor parte de las actividades generadoras de ingresos para la planta. Debido a su importancia estratégica, esta área recibe una asignación significativa de recursos, los cuales deben ser distribuidos de manera eficiente entre los talleres que la conforman, según sus necesidades específicas y su contribución a los objetivos de la organización.

El proceso de monitoreo realizado por el taller de control de calidad debe garantizar una alta disponibilidad de sus equipos y su óptimo funcionamiento. Esto implica mantenerlos en perfectas condiciones a través de calibraciones periódicas, revisiones operativas, capacitaciones para su correcto uso y actualizaciones de sus sistemas cuando sea necesario.

Por lo tanto, entre las principales problemáticas se destacan (Ver Tabla 1-2, 1-3):

A. Equipos desactualizados o en desuso:

- Equipos como el de vibraciones y el de alineamiento se encuentran descontinuados y no son compatibles con los sistemas actuales de la organización.
- Solo se dispone de un único equipo de ultrasonido, insuficiente para cubrir la creciente demanda.
- El equipo de boroscopia fue dado de baja debido a fallos técnicos irreparables, como el mal funcionamiento de su sonda.

El riesgo asociado al uso de equipos obsoletos se justifica cuantitativamente mediante la evaluación del impacto económico derivado de fallas no detectadas en los equipos monitoreados bajo mantenimiento predictivo basado en condición. Estos activos suelen ser equipos de alto valor económico, cuya falla imprevista puede generar consecuencias significativas en términos de costos operacionales, tiempos de inactividad y pérdida de confiabilidad en el sistema.

En este contexto, los equipos de monitoreo predictivo (como vibraciones, ultrasonido, alineamiento y boroscopia) juegan un rol clave al permitir la detección temprana de fallos. No contar con herramientas adecuadas para su aplicación aumenta exponencialmente el riesgo técnico y económico.

Para respaldar esta afirmación, se presenta un ejemplo concreto que cuantifican el impacto económico asociado a la obsolescencia tecnológica de los equipos actualmente en uso, demostrando así la necesidad urgente de su renovación.

Para este caso, se utilizó la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA) como herramienta de apoyo para determinar de forma cuantitativa el riesgo asociado a una falla funcional en un equipo industrial naval de ASMAR (V).

La información utilizada para este análisis fue recopilada a partir de la experiencia técnica de los inspectores del Taller de Control de Calidad, quienes aportaron antecedentes sobre fallas recurrentes y consecuencias operativas asociadas a la falta de detección oportuna, derivadas del uso de equipos de monitoreo obsoletos.

Metodología FMEA aplicada a la falla funcional de un motor PAXMAN.

1-Propósito proceso/equipo.

Equipo: Motor Generador PAXMAN DG H-1

Función: Generar energía eléctrica para abastecer los sistemas eléctricos del buque, con una potencia nominal de [300] kW a una tensión de [440] volts, operando de manera continua o intermitente según la demanda del sistema para el buque “ARAUCANO” de la escuadra.

2-Descripción del proceso.

El motor generador debe operar a una frecuencia de 60 Hz, entregando una tensión de salida de 440 V y una potencia nominal de 300 kW. El sistema puede funcionar en paralelo o en modo redundante, dependiendo de la demanda energética del buque.

3-Falla funcional.

El generador no suministra la potencia requerida de 300 kW a 440 V, lo que representa una pérdida de funcionalidad esencial para el sistema eléctrico del buque.

4- Sistema asociado.

Sistema de abastecimiento eléctrico motor generador PAXMAN DG H-.

A partir de la siguiente tabla, se evidencia que el riesgo económico asociado a la no utilización de herramientas adecuadas de mantenimiento predictivo puede alcanzar un costo estimado de \$1.943.000.000, considerando únicamente una unidad. Este valor refleja el impacto potencial de operar con herramientas inadecuadas, subestimando las fallas que podrían haberse prevenido con una estrategia predictiva efectiva. Cabe destacar que esta estimación corresponde al uso de un solo equipo sometido a un mantenimiento predictivo ineficaz, lo que resalta aún más la criticidad de implementar tecnologías adecuadas en este tipo de activos.

Tabla 1-2: FMEA de un motor PAXMAN.

Modo de Falla	Efecto Falla	FREC FALLAS	MTTR (LOG-EJEC-P EN MARCHA)	IMP. PROD. CLP/hr	COSTOS DIRECTOS POR FALLA CLP/falla	IMP SEG	IMP AMB	RIESGO CUANTITATIVO CLP/año
Deformación o desgaste de soportes del motor	Evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Altas vibraciones producto pata coja. Acción correctiva: Reemplazo de soportes y medición de vibraciones.	1	40	\$ 500.000	\$ 2.500.000	B	C	\$ 22.500.000
Desalineación entre motor y generador	Evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Parámetros de desalineamiento fuera de tolerancia. Acción correctiva: Alinear conjunto motor-generador	1	40	\$ 500.000	\$ 2.500.000	B	C	\$ 22.500.000
Ingreso de objeto extraño en camisas del motor	Evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Golpeteo y baja de potencia de generador. Acción correctiva: Inspección por boroscopia para detectar y eliminar objeto extraño.	1	467	\$ 2.000.000	\$ 15.000.000	B	C	\$ 949.000.000
Desgaste o erosión en paredes de camisas del motor	Evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Emulsión de aceite en motor. Acción correctiva: Inspección END por ultrasonido en camisas del motor.	1	467	\$ 2.000.000	\$ 15.000.000	B	C	\$ 949.000.000
					Riesgo cuantitativo total		\$ 1.943.000.000	

Fuente: Elaboración propia, en base a la metodología FMEA

B. Falta de justificación técnico-económica:

A pesar de que los inspectores de control de calidad han propuesto la adquisición de nuevos equipos basándose en su experiencia, estas solicitudes no han sido priorizadas por la organización debido a la falta de un análisis integral que combine aspectos técnicos y económicos. Esto ha llevado a que el taller no sea considerado una prioridad estratégica en términos de inversión.

Impacto de la problemática:

La ausencia de herramientas actualizadas y funcionales compromete la capacidad del taller para certificar los trabajos con los estándares exigidos, afectando tanto la calidad como la eficiencia de los procesos productivos. Además, la falta de un procedimiento para justificar las adquisiciones desde una perspectiva técnico-económica genera un vacío en la toma de decisiones, lo que impacta negativamente en la sostenibilidad y el desempeño del taller y de la organización.

Propuesta de Solución:

El Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV) se presenta como una herramienta esencial para abordar estas limitaciones. Este enfoque permite:

- ✓ Evaluar de manera integral los costos asociados a los activos, desde su adquisición hasta su retiro.
- ✓ Justificar las inversiones en equipos críticos considerando su impacto técnico y económico.
- ✓ Identificar oportunidades de reducción de costos y mejora continua para la organización.

A través de la implementación de un procedimiento basado en el modelo de Woodward, adaptado al contexto de ASMAR Valparaíso, se podrá:

- Optimizar los recursos asignados al taller.
- Seleccionar equipos que cumplan con las características técnicas y económicas necesarias.
- Reconocer al Taller de Control de Calidad como una unidad estratégica dentro de la organización, contribuyendo directamente al logro de los objetivos operativos y financieros.

La situación actual subraya la necesidad urgente de implementar un modelo que integre los aspectos técnicos y económicos en la toma de decisiones. Este procedimiento no solo permitirá justificar de manera completa la adquisición de equipos de mantenimiento predictivo, sino que también contribuirá a la mejora continua de los procesos y al fortalecimiento del rol estratégico del taller de control de calidad dentro de ASMAR Valparaíso.

Tabla 1-3: Equipos de mantenimiento predictivo dados de baja.

Centro de costos C-366	Descripción del bien	Fecha de alta	Años de uso	Vida residual	Marca	Modelo	Observación
C-366	Analizador de vibraciones	28-02-2009	15	-10	Microlog	GX(AV001)	Descalibrado y sin soporte de recalibración.
C-366	Equipo de alineamiento	30-09-1999	24	-10	Fixturlaser	SHAFT 200	Descontinuado y sin soporte de recalibración.
C-366	Medidor de espesores	31-07-2013	10	-7	GE	DMS GO	Solo se cuenta con 1 equipo para toda la demanda de proyectos.
C-366	Boroscopio industrial	26-08-2015	8	0	Olympus	Ultralite iplex optical	Equipo de baja, debe ser reemplazado.

Fuente: Elaboración propia, en base a información interna de ASMAR(V)

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE COSTOS DE CICLO DE VIDA (ACCV) BASADO EN EL MODELO DE WOODWARD

2. PROCEDIMIENTO ACCV BASADO EN EL MODELO WOODWARD

2.1. ANTECEDENTES DEL MODELO DE WOODWARD

El análisis de costos de ciclo de vida (ACCV) es un procedimiento de análisis económico que utiliza datos técnicos para evaluar la eficiencia económica a mediano y largo plazo entre diversas alternativas de inversión.

Los primeros antecedentes de esta técnica surgen en la década de los 70, cuando comienzan a aparecer las decisiones de inversiones en el sector de la construcción. En el ámbito de la defensa de Estados Unidos, se aplicó principalmente en la evaluación de nuevos sistemas de armamento, enfocándose en la logística y operación, sin incluir aún las fases de producción o diseño.

Entre los años 1992 y 1994, el investigador John Woodward (1997) [2], de la escuela de negocios de la universidad de Staffordshire, Inglaterra, desarrolla una línea de investigación en el área de ingeniería de valor, diseño y optimización de producción, donde incluye los aspectos básicos de los costos de confiabilidad e impacto de los eventos de fallo sobre los costos totales a lo largo del ciclo de vida del activo ACCV, definiéndolo como:

300

"Un proceso de evaluación técnico-económico, aplicado en el proceso de selección y reemplazo de sistemas productivos que permite considerar de manera simultánea aspectos económicos y de confiabilidad, con el propósito de cuantificar el impacto de los activos (\$/año), y de esta manera ser capaz de seleccionar el activo que aporte los mayores beneficios al sistema de producción." [3]

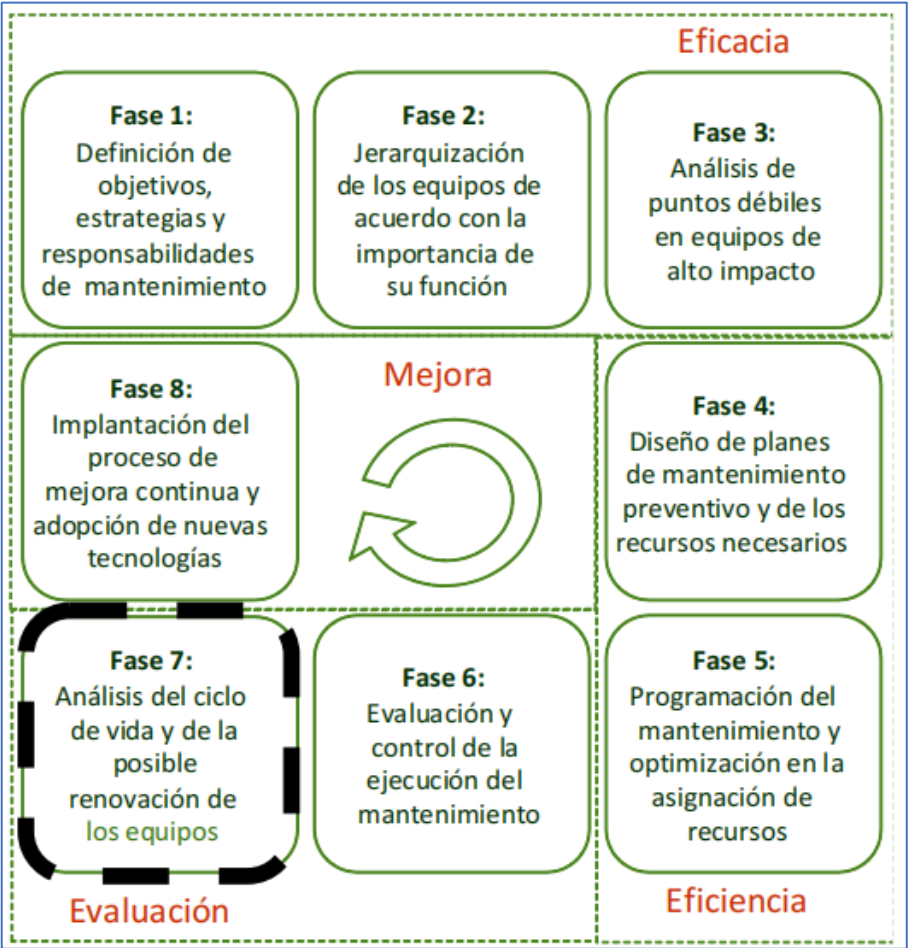
Para los años 1998, los ingenieros D. Williams Y R. Scott, de la firma consultora RM-Reliability Group, desarrollaron un modelo de ACCV basado en la distribución de Weibull para estimar la frecuencia de fallos y el impacto de los costos de confiabilidad.

En 1995 se crea el grupo Woodhouse Partnership, en el cual participaron varios miembros directivos de organizaciones de gran renombre, como Shell, La Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido, La Real Fuerza Aérea, Philips y Kvaerner Engineering. Este grupo de expertos se centró en ayudar a las organizaciones a comprender la conectividad entre los impulsores del negocio, la integridad, la sostenibilidad y aspectos de gestión del riesgo.

John Woodhouse formó y lideró Woodhouse Partership, para más adelante ese mismo año encabezar el proyecto MACRO, un programa de investigación de tres años que reunió técnicas cuantitativas para la toma de decisiones en ingeniería y mantenimiento basadas en costos y riesgos

El proyecto “MACRO” consideró esencial los estudios de Análisis de Modos de Fallas y Efectos de Fallas (FMEA) y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), permitiendo proporcionar algunos puntos de partida para la estimación de patrones de probabilidad (generalmente en forma de tasa de falla promedio).

Para el desarrollo de este procedimiento dentro de un contexto de gestión de mantenimiento, se consideró el modelo de referencia de gestión de manteniendo de 8 fases, propuesto en el libro “ Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos” [4]. La técnica ACCV está relacionada a la fase 7 de este modelo (Ver Figura 2-1), donde se ubican las acciones que se deben seguir en los diferentes procesos de gestión para asegurar la eficiencia, eficacia y mejora continua de la gestión del mantenimiento. Este modelo cubre los 24 requerimientos de la norma ISO 55000:2014 [5], lo que lo convierte en un modelo integral y práctico para ser aplicado a distintos niveles las diferentes estrategias de mantenimiento.



Fuente: Libro ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos, 2019

Figura 2-1: Modelo de gestión de mantenimiento integrado a la ISO 55000

En cuanto a la normalización de esta metodología, una de las guías más relevantes a nivel internacional es la norma ISO 60300-3-3:2004 (Dependability management- Part 3-3: Application guide Life cycle costing). Esta norma es ampliamente utilizada en el ámbito de la ingeniería de mantenimiento y la gestión de activos, ya que define de forma estructurada el proceso de análisis de costos de ciclo de vida aplicado a sistemas técnicos. Además, establece la relación directa entre los costos del ciclo de vida y variables clave como la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, siendo aplicable en procesos de adquisición, evaluación de alternativas, análisis de riesgo y optimización de costos operacionales.

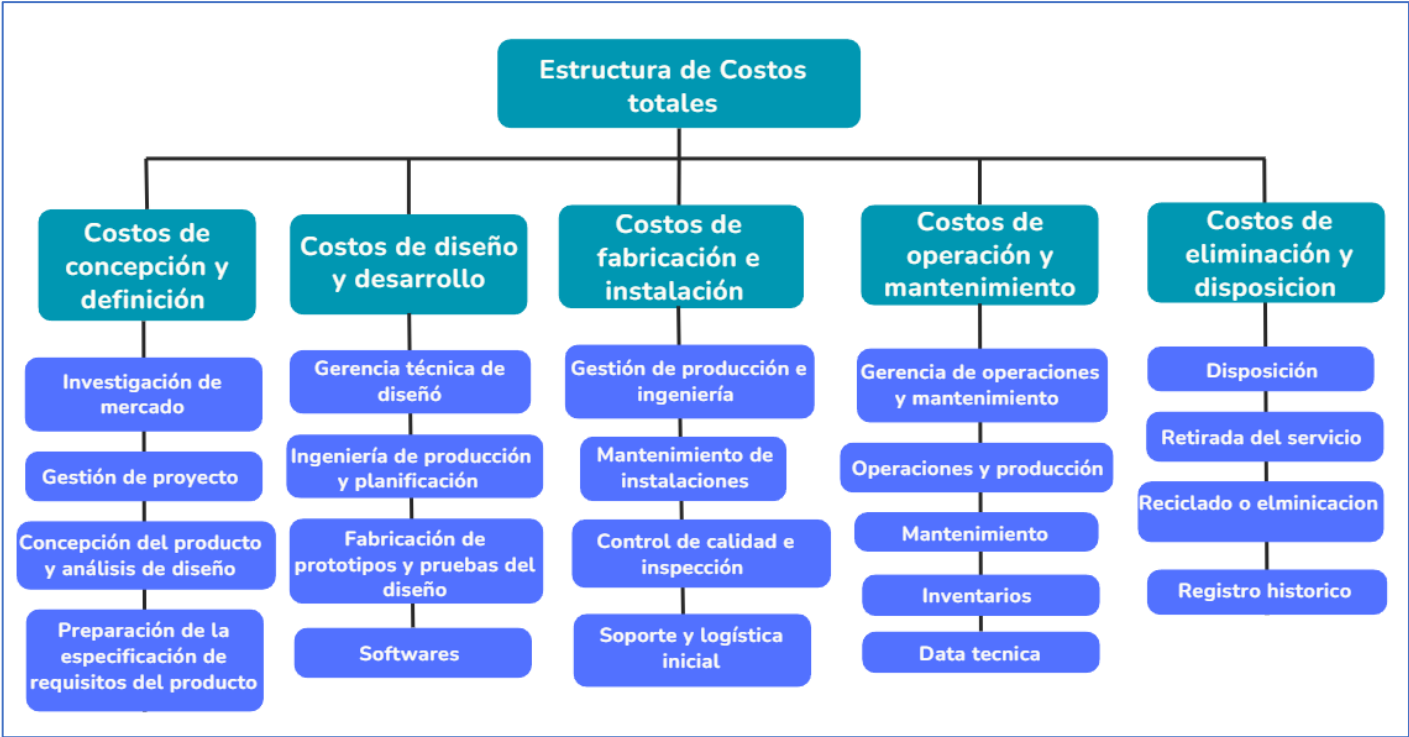
2.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL PROCEDIMIENTO ACCV

Se establece que el dueño del activo está obligado a financiar todos los recursos necesarios para garantizar el cumplimiento de las funciones operativas y el proceso de desincorporación del activo durante cada etapa de su ciclo de vida. Este compromiso implica una planificación cuidadosa y un análisis detallado de los costos que surgen en cada fase, con el objetivo de gestionar de manera eficiente los recursos y optimizar el rendimiento económico del activo. Para facilitar esta gestión, se emplea la estructura desglosada de costos típicos (Cost Breakdown Structure CBS) [6].

La definición de estas categorías y su alcance puede variar significativamente, dependiendo de una serie de factores. Entre ellos, destacan el tipo de activo en cuestión, la disponibilidad y calidad de la información requerida para su gestión, las características específicas del proceso de diseño, las condiciones económicas imperantes, los recursos humanos involucrados y las tecnologías empleadas en las distintas fases del ciclo de vida. Cada uno de estos aspectos influye directamente en la naturaleza y magnitud de los costos, lo que subraya la importancia de realizar un análisis exhaustivo y detallado.

A continuación, se presenta el fundamento de las principales categorías de costos, con el propósito de proporcionar una comprensión clara y precisa sobre los recursos necesarios en cada etapa del ciclo de vida de los equipos. El (Diagrama 2-1) ilustra los costos típicos que se deben considerar, incluyendo aquellos relacionados con la adquisición, operación, mantenimiento y disposición final.

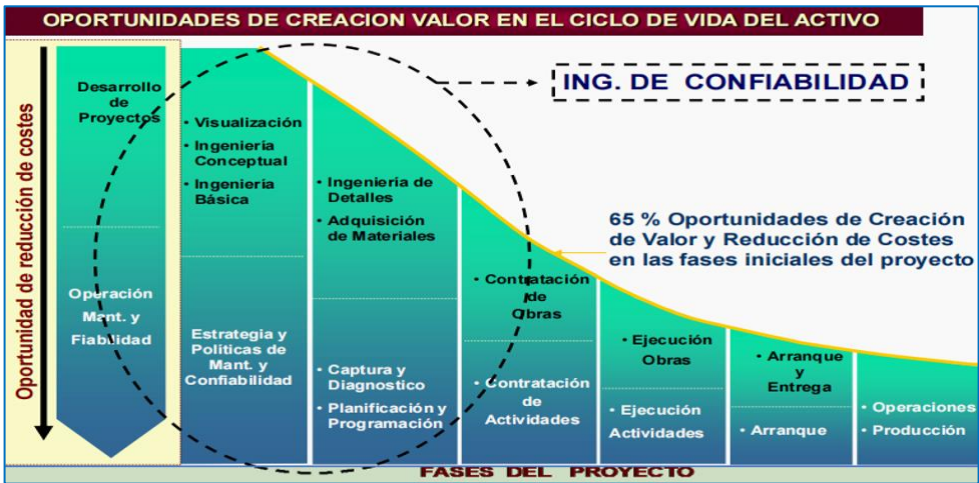
Diagrama 2-1: Desglose de actividades más usuales para la identificación de costos.



Fuente: Elaboración propia, en base a UNE 60300-3-3:2004

- a) **Costos de concepción y definición:** Estos costos están relacionados con las actividades iniciales del ciclo de vida del producto, cuyo objetivo es garantizar su viabilidad técnica, económica y operativa. Incluyen estudios preliminares de factibilidad, donde se evalúa si el producto es viable desde el punto de vista técnico y financiero, considerando las demandas del mercado y los recursos disponibles. También abarcan la definición de requerimientos, que consiste en identificar y especificar las características y funciones necesarias para cumplir con las necesidades del cliente y los estándares de calidad establecidos. Esta etapa es fundamental, ya que las decisiones tomadas aquí determinan en gran medida los costos futuros y la viabilidad general del producto. Una adecuada inversión en esta fase puede reducir riesgos, minimizar costos posteriores y maximizar el éxito en el mercado.
- b) **Costos de diseño y desarrollo inicial:** Estos costos corresponden a las actividades realizadas en las primeras etapas del desarrollo de un sistema, incluyendo la ingeniería básica y de detalle, diseñadas para cumplir con las especificaciones del producto y garantizar, a través de pruebas, que estas se alcancen. Es importante destacar que las decisiones tomadas en las fases iniciales del ciclo de vida tienen un impacto significativamente mayor en comparación con las decisiones adoptadas en etapas posteriores. La experiencia ha demostrado que, durante las primeras fases del desarrollo y análisis, más de la mitad de las decisiones críticas que afectan el resultado final ya están definidas. Como se ilustra en la figura siguiente, las oportunidades para reducir costos son más evidentes al comienzo del proyecto, donde se estima que hasta un 65% de las posibilidades de creación de valor y disminución de costos a lo largo

del ciclo de vida pueden ser identificadas y aprovechadas. Esto resalta la importancia estratégica de tomar decisiones informadas y bien fundamentadas en las etapas iniciales del desarrollo (Ver Gráfico 2-1).



Fuente: Libro ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos 2019

Gráfico 2-1: Creación de valor en fases tempranas en la categoría de costos.

c) Costos de fabricación e instalación: Los costos de fabricación e instalación se refieren a los recursos necesarios para producir y poner en funcionamiento un producto o servicio. Estos costes están determinados tanto por actividades puntuales (no recurrentes), como por actividades que se repiten con cada producto o servicio (recurrentes).

Los costos no recurrentes están relacionados a los que se realizan una sola vez, principalmente al inicio del proyecto como son los costos de:

- Ingeniería y análisis: Diseño de procesos y operaciones.
- Infraestructura: Construcción de instalaciones y equipos de producción.
- Soporte y pruebas: Equipos especializados y pruebas de calidad.
- Formación y documentación: Capacitación inicial y creación de manuales.
- Software: Desarrollo o adquisición de sistemas necesarios.

Los costos recurrentes, se asocian a las actividades que se repiten cada vez que se fabrica o instala un producto los cuales pueden incluir:

- Producción: Materiales, mano de obra y mantenimiento de equipos.
- Control de calidad y montaje: Inspección, ensamblaje e instalación.
- Logística: Embalaje, transporte y almacenamiento.
- Formación continua: Actualización constante del personal.

- d) Costos de operación y mantenimiento: Durante la vida del activo se espera incurrir en costos de operación. Estos costos suelen ser los más significativos y difíciles de prever, pudiendo superar hasta diez veces los costos iniciales de adquisición, los cuales pueden catalogarse como:

Costes asociados al mantenimiento preventivo

- No recurrentes: Incluyen la adquisición de equipos de prueba y herramientas, repuestos iniciales, consumibles, formación inicial del personal, documentación e instalaciones.
- Recurrentes: Se refieren a mano de obra, repuestos, consumibles, formación continua y documentación.
- Sustitución de piezas con vida limitada: Puede ser un coste recurrente o no, dependiendo de las características de las piezas.

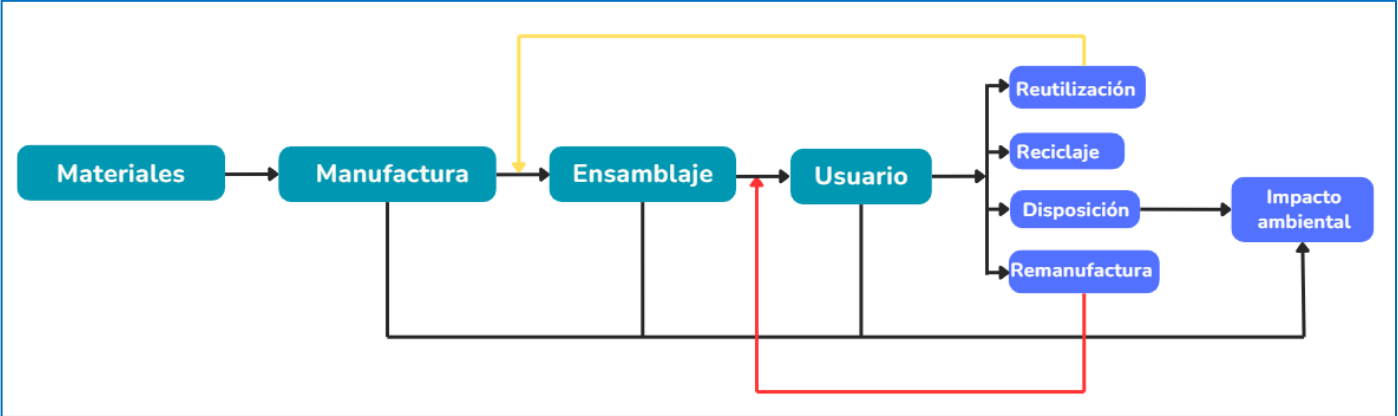
Costes asociados al mantenimiento correctivo:

- No recurrentes: Incluyen equipos de prueba, herramientas, repuestos iniciales, formación inicial del personal, documentación e instalaciones.
- Recurrentes: Comprenden mano de obra, repuestos, consumibles, formación continua y documentación.
- Costes de consecuencias: Relacionados con pérdidas de producción, capacidad, garantías, de responsabilidad o debido a la pérdida de ingresos.

- e) Costos de eliminación: Los costos asociados a la desincorporación o eliminación de activos incluyen actividades como la conversión de materiales, el uso de recursos energéticos y la disposición de desechos. El enfoque al ciclo de vida aplicado a los costos de eliminación de un activo se centra en minimizar los impactos ambientales y optimizar el desempeño socioeconómico desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Esto incluye actividades como la gestión de residuos, el control de emisiones y la restauración ambiental (Ver Diagrama 2-2).

Adicionalmente, los costos vinculados al reciclaje, la reutilización y la disposición final representan una parte importante del análisis de los costos totales. Estas etapas tienen un impacto ambiental considerable, pero también son cruciales para reducir costos y maximizar el valor durante el ciclo de vida del activo. Este análisis ayuda a cumplir normativas ambientales, promover innovaciones sostenibles y maximizar el valor económico y ambiental del activo eliminado, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la competitividad organizacional

Diagrama 2-2: Diagrama de proceso de gestión de residuos.



Fuente: Elaboración propia, en base a en base Ishii et al. 1994

En particular, para aclarar de forma efectiva la categoría de costos, se considera a continuación el siguiente gráfico, que nos muestra las características representativas de los costos de capital CAPEX, por sus siglas en inglés (Capital expenditure) y costos operacionales OPEX (Operational Expenditures).

En este se muestran dos opciones que ejemplifican la importancia del desglose de costos en función del tiempo. La opción N°1, se observa que los costos de desarrollo y de inversión relacionados a los costos CAPEX fueron mucho menores que los de la opción N°2, lo que refleja un bajo análisis de desarrollo y de inversión en las fases iniciales. Esto, a su vez, repercute en los costos OPEX representado por un alto índice de costos por confiabilidad en comparación a la opción 2 (Ver Gráfico 2-1).

Fuente: Curso de gestión de activos, 4 semestre, Ing. Mantenimiento Industrial USM

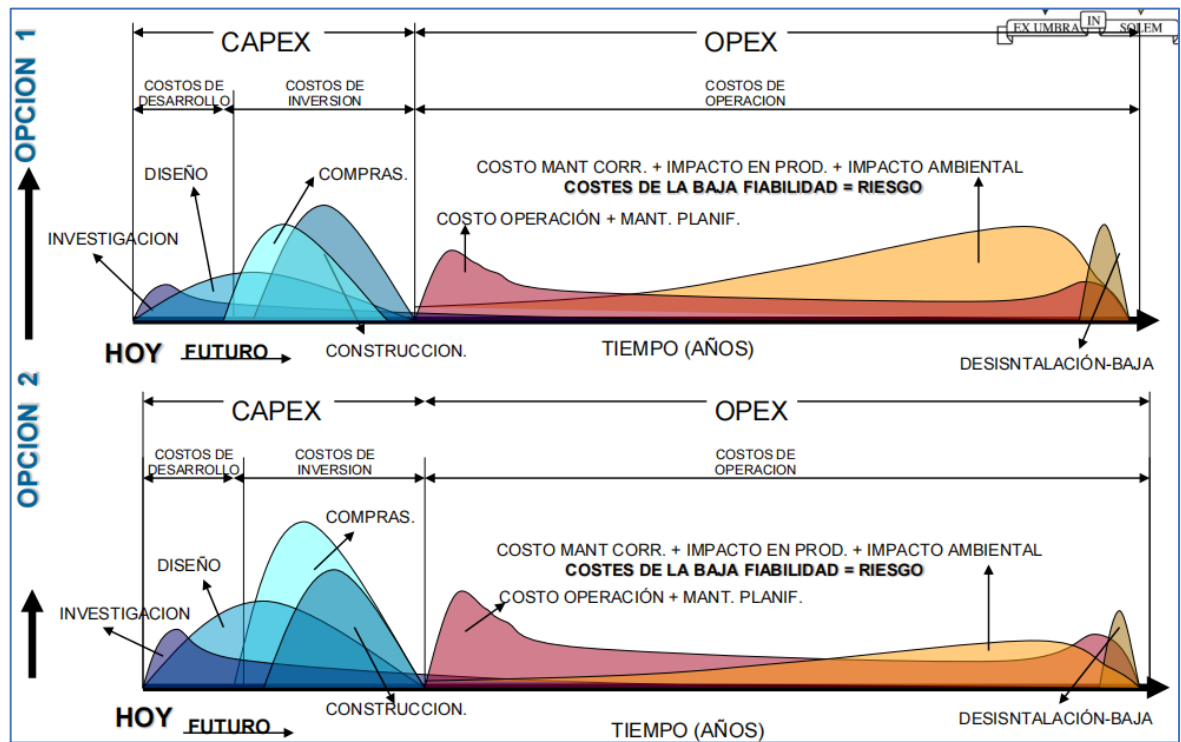


Gráfico 2-1: Imagen representativa de los costos CAPEX-OPEX.

La relación anterior pone en evidencia que gran parte de los costos en el ciclo de vida de un activo pueden ser absorbidos por los costos por confiabilidad y el bajo costo de desarrollo en las fases iniciales. Por este motivo, el ACCV se presenta como una herramienta que permite identificar la mejor opción en los casos de adquisición o de renovación de equipos mediante la evidencia económica.

En nuestro caso de estudio, el alcance para la estimación de costos por penalización está limitado debido a la información que únicamente maneja el área de administración. Por esta razón, se planteará solamente la estimación de los costos por no contar con un especialista trabajando en el área de mantenimiento predictivo.

2.3. PROCESO DE APLICACIÓN DE TÉCNICA DE ACCV.

El análisis de Costo de Ciclo de Vida (ACCV) ha ganado importancia debido a la cantidad de metodologías que facilitan la evaluación de diseños y alternativas para maximizar la eficiencia en el uso de recursos humanos y económicos. Estas técnicas son particularmente útiles durante las etapas iniciales de diseño conceptual y preliminar, donde se define aproximadamente dos tercios de los costos totales del ciclo de vida. A medida que el ciclo de vida del activo avanza, las posibilidades de realizar modificaciones significativas en los costos se reducen considerablemente.

El ACCV se aplica a lo largo de todas las etapas del diseño y producción, desde el desarrollo inicial hasta su operación y soporte logístico. Durante este proceso, los costos actúan como parámetros esenciales para comparar diferentes configuraciones de diseño y seleccionar las soluciones más adecuadas. Sin embargo, garantizar la precisión en la estimación de costos es fundamental, ya que errores en esta fase pueden generar importantes repercusiones financieras.

En términos generales, los errores en las estimaciones de costos pueden presentarse de dos formas: subestimación o sobreestimación de los costos reales.

- Subestimación de costos: Cuando los costos reales superan las estimaciones iniciales, los planes previstos, como contratación, adquisición de materiales y ejecución de actividades, pueden volverse inviables. Esto obliga a reorganizar los planes, lo que generalmente incrementa los costos totales.
- Sobreestimación de costos: Cuando las estimaciones son mayores que los costos reales, el excedente financiero esperado suele ser utilizado de manera ineficiente, a menos que exista un control estricto de costos, lo cual es poco común. Esto dificulta aprovechar plenamente las ventajas de una estimación conservadora. En ambos casos, la falta de precisión en las estimaciones puede comprometer la viabilidad financiera del proyecto y dificultar el cumplimiento de sus objetivos, destacando la importancia de contar con análisis de costos sólidos y bien fundamentados desde las etapas iniciales del desarrollo.

En cuanto a las técnicas de estimación, durante las etapas iniciales del diseño, donde la información disponible es limitada, se emplean modelos paramétricos con una precisión de entre el 20% y el 50%. A medida que el diseño avanza a fases intermedias, la mayor disponibilidad de datos permite el uso de modelos comparativos, alcanzando precisiones del 70% al 85%. Finalmente, en la etapa de diseño detallado, con toda la información del activo ya disponible, los modelos detallados logran una precisión entre el 85% y el 95%.

2.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONFIABILIDAD EN EL MODELO ACCV

Una de las principales causas del incremento de los costos en el ciclo de vida de un activo es la falta de previsión frente a fallos inesperados, especialmente durante la fase de diseño. Según Woodhouse, esta situación surge principalmente por la ausencia de análisis y conocimiento en las etapas iniciales sobre aspectos relacionados con la confiabilidad. Este enfoque destaca la importancia de calcular detalladamente los costos asociados a la confiabilidad, ya que estos reflejan el impacto económico de los fallos a lo largo del ciclo de vida del equipo.

La cuantificación de la confiabilidad persigue dos objetivos fundamentales. Primero, permite prever posibles interrupciones en los procesos de producción causadas por fallos inesperados, así como analizar la frecuencia con la que estos eventos ocurren. Segundo, facilita la evaluación de los costos derivados de dichos fallos, considerando su impacto en aspectos clave como la seguridad, el medio ambiente, las operaciones y la producción.

En este contexto, la confiabilidad se refiere a la capacidad de un sistema de producción para operar de manera segura y eficiente durante su ciclo de vida. Una disminución en la confiabilidad, debido a fallos inesperados, genera costos significativos relacionados con la restauración del sistema y las interrupciones en la producción. Estos costos incluyen tanto costos directos como costos por penalizaciones.

Los costos por estos modos de fallos “inesperados” se representan de la siguiente forma:

- Costos por penalización: Costos debido a que el equipo se encuentra indisponible para ser utilizado, en donde existen pérdidas de oportunidad o producción, pérdidas operacionales, impacto en la calidad, seguridad o ambiente.
- Costos directos por mantenimiento correctivo: Principalmente es dado por los costos de mano de obra, materiales y repuestos.

El impacto de los costos asociados a la confiabilidad se encuentra directamente relacionado con dos indicadores clave: el MTBF (Mean Time Between Failure , o tiempo promedio entre fallos) y el MTTR (Mean Time to Repair , o tiempo promedio de reparación) . Sus cálculos se representan en la ecuación 2.1 y 2.2

$$MTBF = \frac{\text{tiempos operacionales}}{\text{número de fallas}} \quad (2.1)$$

Ecuación 2.1: Tiempo promedio entre fallo.

Un equipo que sufra fallas con alta frecuencia en un corto período de operación se considera de baja confiabilidad operacional, lo que se refleja en un MTBF reducido. Es fundamental señalar que la confiabilidad de un equipo puede variar considerablemente según las condiciones de su entorno operativo, lo que influye directamente en su desempeño y estabilidad.

$$MTTR = \frac{\text{tiempos de reparación}}{\text{número de fallas}} \quad (2.2)$$

Ecuación 2.2: Tiempo promedio de reparación.

Los sistemas con MTTR largos se distinguen por requerir tiempos de reparación significativamente altos. En particular, el tiempo necesario para restaurar un equipo a su funcionamiento dependerá de la complejidad técnica asociada a su reparación. Diversos factores pueden influir en este proceso, como la disponibilidad de repuestos, la capacitación del personal y el acceso a herramientas especializadas. Cuando estos tiempos son excesivos, la mantenibilidad del equipo se ve comprometida, afectando su disponibilidad y eficiencia operativa.

Durante las etapas de anteproyecto, diseño o fabricación, es fundamental tomar decisiones adecuadas, ya que estas tendrán un impacto directo en su desempeño futuro. Uno de los aspectos clave a considerar es la mantenibilidad del equipo, es decir, su capacidad para ser reparado de manera eficiente y en el menor tiempo posible. Un diseño que priorice la mantenibilidad no solo reduce los tiempos de inactividad, sino que también optimiza los costos operativos y mejora la confiabilidad del sistema en el largo plazo.

2.5. MODELO DE ACCV DE WOODWARD

Para desarrollar este procedimiento Woodward ha definido una serie de pasos que aseguran un enfoque sistemático y práctico en su aplicación. Estos pasos están diseñados para guiar el análisis de manera clara y estructurada, permitiendo una evaluación precisa y comprensiva de los equipos que serán puestos a competir. El método de análisis de

costos de ciclo de vida busca evaluar los impactos de los fallos de un sistema de producción poniendo en evidencia los efectos económicos que conlleva. Este enfoque parte del supuesto de que la tasa de fallos de un activo permanece constante durante toda su vida útil, es decir, se asume que el activo falla a una frecuencia estable sin considerar el tiempo transcurrido desde el inicio de su operación.

El ACCV tiene como objetivo principal medir el impacto económico de los fallos en los costos totales del equipo en estudio. Este análisis considera diversos factores, como los costos generados por una baja confiabilidad, los gastos asociados al mantenimiento preventivo y correctivo, la frecuencia de los fallos y otros elementos que afectan directamente la eficiencia y confiabilidad del activo. A través de este enfoque, la organización puede identificar y gestionar de manera más eficiente los costos operativos, optimizando el desempeño del sistema.

- Ventajas del modelo de Woodward:

Una de las principales ventajas de este modelo es su simplicidad y facilidad de aplicación, especialmente útil en escenarios donde no se dispone de datos detallados sobre la confiabilidad del activo. Esto permite obtener estimaciones rápidas y generales de los costos relacionados con los fallos, lo que resulta valioso en etapas iniciales de evaluación o cuando se requieren decisiones ágiles.

- Limitaciones:

Sin embargo, esta simplicidad también limita el modelo, ya que la mayoría de los equipos no presentan tasas de fallos constantes. En la práctica, la confiabilidad de un activo puede variar significativamente a lo largo de su vida útil debido a factores como envejecimiento, desgaste, condiciones de operación y el entorno en el que se desempeña. Estas variaciones no son consideradas en el modelo de Woodward, lo que puede afectar su precisión para ciertos escenarios, aunque sí reduce la incertidumbre en la toma de decisiones iniciales.

- Otros modelos aplicables:

Para superar estas limitaciones, se pueden utilizar modelos más avanzados que consideran la variabilidad en la tasa de fallos a lo largo del tiempo, como el modelo de tasa de fallos Weibull y el modelo de Tasa de fallos proporcional al tiempo (PTFR). Estos modelos son más flexibles y se adaptan mejor a las características de confiabilidad de los activos en diferentes etapas de su ciclo de vida. Por ejemplo, el modelo Weibull es particularmente útil para capturar comportamientos típicos de los activos, como la alta tasa de fallos inicial (infancia) y el aumento de fallos al final de su vida útil (envejecimiento), proporcionando una representación más precisa de la realidad operativa.

2.5.1. Procedimiento del ACCV basado en el modelo de Woodward

Para aplicar de manera efectiva el análisis de costos de ciclo de vida (ACCV) en la selección de tecnologías de mantenimiento predictivo, se establece el siguiente paso a paso:

PASO N°1: Definir las condiciones operacionales del sistema.

- Describir los modos de operación del sistema: carga completa, media carga, sin carga.
- Definir las capacidades de producción que deben ser satisfechas en cada modo.

PASO N°2: Establecer los factores de utilización.

- Indique el estado de funcionamiento dentro de cada modo de operación, detallando cómo se utilizan los recursos en cada escenario.

PASO N°3: Identificar y evaluar las opciones existentes.

- Identificar las alternativas disponibles: Recopile información sobre las distintas opciones de equipos que pueden satisfacer las necesidades de producción exigidas.

PASO N°4: Identificar las categorías de costes básicos.

- Para cada alternativa de equipo, identifique todas las categorías de costos según el modelo de Woodward (Ver Diagrama 2-1).

PASO N°5: Determinar los costes por confiabilidad (TCPF).

- Identificar los principales modos de fallo para cada alternativa y determinar la frecuencia de ocurrencia de estos fallos mediante indicadores como el MTBF (tiempo medio entre fallos) y el MTTR (tiempo medio de reparación). Considerar estos valores como constantes a lo largo de la vida útil del activo.

PASO N°6: Determinar los costes críticos.

- Identificar las categorías de costes con mayor impacto: Examinar todas las categorías de costes y seleccionar aquellas con un impacto considerable en el presupuesto total.
- Analizar los factores que propician los altos costes: Investigar las causas subyacentes de estos altos costes, incluyendo factores operativos, tecnológicos y organizacionales.
- Proponer estrategias de control: Desarrollar estrategias específicas para controlar y reducir estos costes elevados.

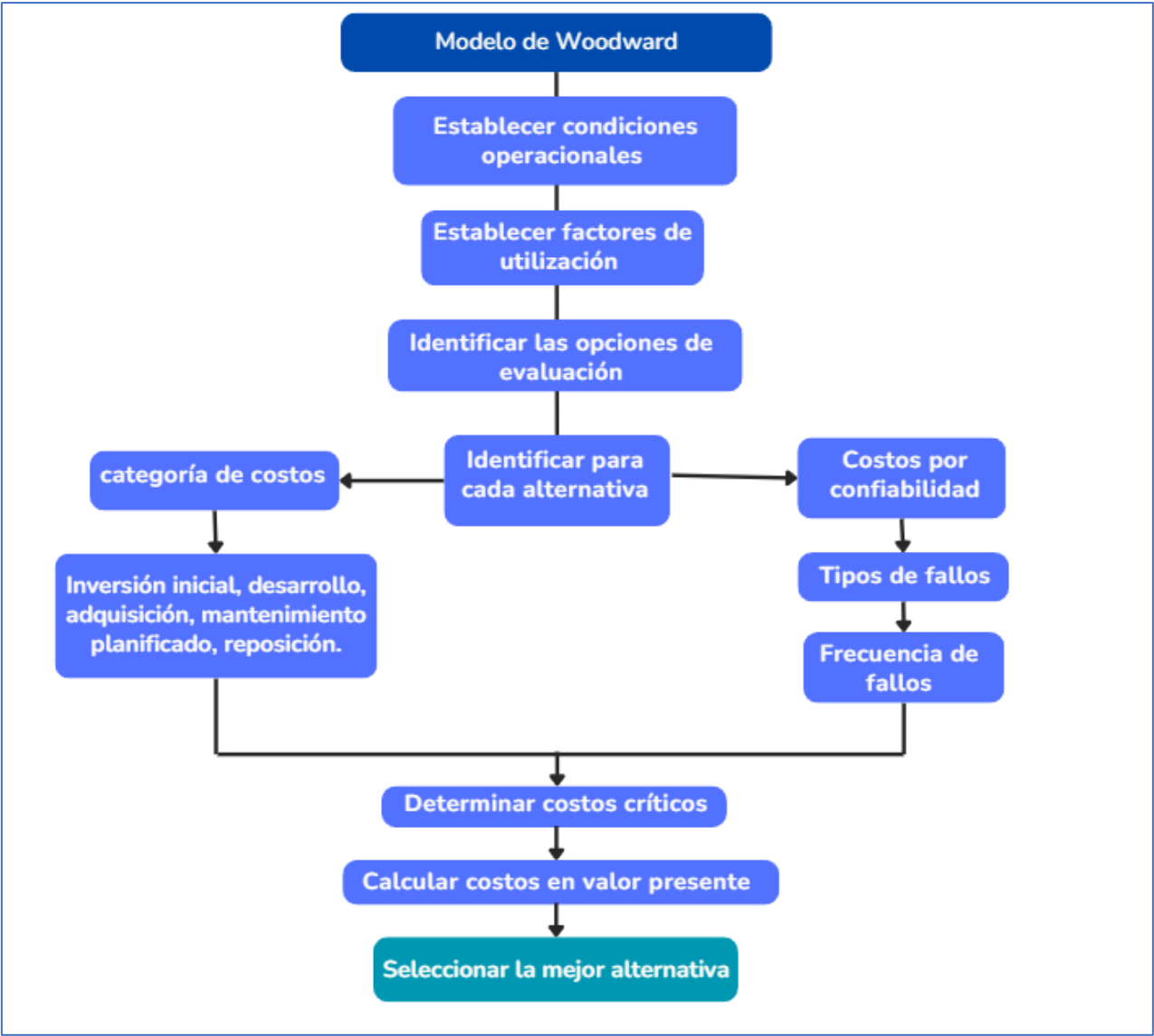
PASO N°7: Calcular los costos en valor presente.

- Utilizar un factor de descuento adecuado y definir el periodo de vida útil esperado para calcular los costos totales en valor presente de cada alternativa evaluada.

PASO N°8: Seleccionar la alternativa ganadora.

- Comparar los costos totales de las alternativas evaluadas: Realizar una comparación detallada de los costos totales en valor presente de todas las opciones disponibles.
- Seleccionar la opción que genere el menor costo para el período de vida útil esperado: Elegir la alternativa que minimice los costos a lo largo de la vida útil del activo, considerando la confiabilidad y los costos de inversión.

A continuación, se muestra el diagrama de procesos basado en el modelo de Woodward, el cual sirve como una guía integral para evaluar los procesos generales de la técnica de análisis de costos del ciclo de vida. Este diagrama está diseñado para asegurar que todos los aspectos relevantes sean considerados y que las mejores prácticas se apliquen de manera consistente en cada etapa del proceso (Ver Diagrama 2-3):



Fuente: Elaboración propia basada en el modelo Woodward.

Diagrama 2-3: Modelo de ACCV de Woodward.

Woodward establece la siguiente ecuación para calcular los costos totales de ciclo de vida de un activo [7]:

$$CTCV(P) = \sum_{T=1}^T CI + CO + CMP + TPCf + CMM - VR \quad (2.3)$$

Ecuación 2.3: Costos totales del ciclo de vida del equipo a evaluar en valor presente basado en el modelo de Woodward.

Donde se tiene:

- CTCV(P): Son los costos totales de ciclo de vida llevados a valor presente (P) a una tasa de interés (i) [8] y un periodo de vida útil (T).
- CI: Coste inicial de adquisición e instalación. Estos están constituidos por costos de anteproyecto, diseño, construcción, entrega, instalación , capacitación para operar o mantener etc.
- CO: Costos operacionales anuales. Estos costos pueden incluir costos tales como: operación, energía, insumos, modificaciones, ingeniería, logística de repuestos, adiestramiento, mano de obra, producción, etc. Estos costos son relevantes debido a que pueden exceder el costo de adquisición en algunos casos.
- CMP: Costos de mantenimiento preventivo anual. Estos son los costos asociados con las actividades de mantenimiento que se realizan de manera regular para prevenir fallos y asegurar que los equipos funcionen de manera eficiente. Normalmente se calculan de forma anual.
- CMM: Costos de mantenimiento mayor, dados como valor futuro. Estos son los costos asociados con el mantenimiento que no se realiza con tanta frecuencia, pero que es necesario para asegurar la longevidad y el rendimiento del equipo. Estos costos suelen ser más altos y se calculan como valores futuros debido a su naturaleza eventual.
- TPCF: Costos totales por confiabilidad (fallos), dados como valor anualizado. Estos son los costos asociados con los fallos del equipo y la pérdida de confiabilidad. Se calculan de manera anual y se llevan a valor presente.
- VR: Valor de reposición. El valor de reposición es el costo asociado con la sustitución de un equipo al final de su vida útil. Este valor considera el costo de adquirir un equipo nuevo o una versión actualizada del equipo existente, asegurando que se mantenga la misma capacidad operativa y funcionalidad.

Para implementar la ecuación descrita, es fundamental desglosar y explicar cada uno de sus términos. Esto permite estructurar los pasos de manera clara, garantizando un enfoque comprensible y efectivo en su aplicación.

1. El primer valor que se debe identificar son los costos iniciales (CI), correspondiente a todos los costos asociados a la adquisición, instalación y puesta en marcha de las tecnologías de mantenimiento predictivo. Incluyendo los costos administrativos, licitaciones y garantías necesarias para implementar el sistema.
2. El segundo valor es determinar los costos operativos (CO) derivados de la operación de las tecnologías, como los costos por especialista y horas extras.
3. El tercer valor es determinar los costos por mantenimiento preventivo (CMP), en donde se consideran los planes de mantenimiento recomendados por el fabricante, detallando los repuestos y frecuencias requeridas. Estos costos deben estar calculados en costos anuales. En nuestro caso, los costos de calibración anual requeridos.
4. El cuarto valor es calcular los costos por confiabilidad (TCPF): Identificar los modos de fallo más relevantes de las tecnologías, asignar una frecuencia de fallos constante y estimar su impacto económico en producción, seguridad y operaciones a lo largo de la vida útil del sistema (Se explicará más adelante).
5. En el quinto valor se calculan los costos de mantenimiento mayor (CMM): Se determinan los costos asociados a intervenciones de gran escala o reemplazo de componentes críticos, basándose en los tiempos de vida útil especificados por el fabricante. En el caso de los equipos predictivos, se considera reemplazo de baterías dos veces en su ciclo de vida.
6. El último valor es calcular el valor de reposición (VR): Este paso considera el valor residual de las tecnologías al final de su vida útil, el cual puede provenir de su venta, reciclaje o disposición final. Este valor debe integrarse al cálculo total de costos. En este caso específico, debido a la naturaleza portátil de los equipos y la falta de información detallada sobre su retirada, se asume que este valor no tiene un impacto significativo en el análisis y por lo tanto, no se incluye en el cálculo.

El modelo de Woodward ofrece una metodología eficaz para analizar los costos asociados a la confiabilidad, centrándose en el impacto económico de los fallos más relevantes dentro de la estructura de costos de un sistema de producción. Este enfoque estructurado sigue una serie de pasos clave: primero, se identifican los fallos más críticos; luego, se asigna a cada tipo de fallo una frecuencia de ocurrencia constante, considerada uniforme a lo largo de la vida útil proyectada del equipo.

A continuación, se describe de forma detallada el proceso de cálculo del costo en valor presente generado por los fallos (PASO N°5, N°6, N°7):

1. Definir los tipos de fallos (f). Donde $f=1 \dots$ para f tipos de fallos. Estos fallos deberán considerarse como los más relevantes y recurrentes basados en información de datos internos o externos. También pueden complementarse con información grupal mediante técnicos expertos, personal especialista o encargado de los equipos.
2. Definir la frecuencia de fallos: Calcular la frecuencia de fallos esperada por año (δ_f), asumiendo que esta frecuencia es constante a lo largo de la vida útil esperada para cada tipo de fallo. Utilizar la fórmula (2.4):

$$\delta_f = \frac{N}{T} \quad (2.4)$$

Ecuación 2.4: Frecuencia de fallos.

Donde:

- δ_f = Número total de fallos al año.
- N = Número total de fallos.
- T = Número total esperado de años de vida útil.

3. Calcular los costos asociados a cada tipo de fallo: Determinar los costos asociados a cada tipo de falla C_f (\$/Fallo) para cada alternativa de adquisición. Estos costos incluyen los repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional. Utilizar la fórmula (2.5): Debido al alcance de algunos datos de costos por penalización que sufren los equipos al no estar disponibles, es posible que el nivel de certeza no sea tan preciso, por lo que es recomendable buscar bien esta información y agregarla.

$$C_f = \sum_{f=1}^F MTTR_f \times Cpe_f \quad (2.5)$$

Ecuación 2.5: Costos de cada tipo de falla.

Donde:

- C_f = Costos de cada fallo (\$).
- MTTR = Tiempo promedio para reparar cada fallo (horas/fallo).
- Cpe_f = Costos de penalización por hora (producción, mano de obra, repuestos) (\$/hora).

3. Calcular los Costos Totales Anuales por Falla: Calcular los costos totales por fallas al año (TCP_f), utilizando la fórmula (2.6):

$$TCP_f = \sum_{f=1}^F C_f \times \delta_f \quad (2.6)$$

Ecuación 2.6: Tiempo promedio de reparación.

Donde:

- TCP_f = Costo total por fallas (\$/año)
- C_f = Costos de cada fallo (\$).
- δ_f = Número total de fallos.

4. Calcular los costos totales por fallo en valor presente: Convertir el valor anualizado de los costos totales por fallas a su valor presente ($PTCP_f$), utilizando la siguiente ecuación (2.7):

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1+i)^T - 1}{1 \times (1+i)^T} \quad (2.7)$$

Ecuación 2.7: Costos totales por fallos en valor presente.

Donde :

- $PTCP_f$ = Costos totales por fallo
- TCP_f = Valor anualizado.
- T = Vida útil esperada.
- i = Tasa de descuento.

Una vez identificados y determinados todos los costos incluidos en la ecuación (2.1), el siguiente paso es realizar la sumatoria total de estos valores y calcular su valor presente (PASO N°7). Para ello, se aplica una tasa de interés seleccionada que refleje las condiciones financieras de la organización, junto con el período de vida útil previamente definido para el activo. Este cálculo no solamente consolida los costos en términos económicos actuales, sino que también permite una evaluación más precisa de las alternativas disponibles (PASO N°8) [9].

**CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO ACCV PARA LA
SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN ASMAR**
(V)

3. IMPLEMENTACIÓN DEL ACCV EN LAS TECNOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE ASMAR (V)

En este último capítulo, se realizará la evaluación del análisis de costos de ciclo de vida ACCV de los equipos de mantenimiento predictivo del taller de control de calidad (C-366) de ASMAR (V), utilizando el modelo de Woodward descrito en el capítulo anterior. A lo largo de la tesis, se ha enfatizado la importancia del ACCV como herramienta crucial para optimizar recursos, mejorar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los activos, permitiendo justificar inversiones de equipos de manera técnica y económica. Esta metodología permitirá una evaluación integral y exhaustiva de los costos asociados a lo largo de la vida útil de los equipos. Este enfoque facilitará la toma de decisiones informadas, estratégicas y de menor riesgo, asegurando que las adquisiciones contribuyan significativamente al mantenimiento de los estándares de calidad y eficiencia operativa de la organización.

El análisis considera cuatro tecnologías de mantenimiento predictivo, seleccionando dos opciones para cada tecnología para su evaluación. Los equipos y tecnologías serán presentados y evaluados según el orden establecido en la siguiente tabla, facilitando una comparación detallada de sus características y rendimientos (Ver Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Orden de evaluación de los equipos de mantenimiento predictivo.

Letra	Equipos de evaluación
A	Equipos de análisis de vibraciones
B	Equipos de ultrasonido
C	Equipos de boroscopia
D	Equipos de alineamiento laser

Fuente: Elaboración propia de orden de evaluación

El objetivo para cada alternativa es determinar cuál de los dos equipos puestos a competir presenta una mayor prefactibilidad económica para su adquisición por parte de la organización ASMAR(V). Este proceso implica una selección basada en un análisis integral de riesgo económico, justificando tanto técnica como económicamente ambas tecnologías en competencia.

3.1. **A - EVALUACIÓN DEL ACCV PARA LOS EQUIPOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

3.1.1. Procedimiento

PASO N°1: Establecer las Condiciones Operacionales del Sistema.

- Los equipos de análisis de vibraciones operan de manera continua debido a las demandas constantes de los clientes de la Armada para sus embarcaciones. Estos equipos son esenciales para monitorear diversas máquinas y equipos a bordo. La toma de mediciones precisa y oportuna es crucial para cumplir con las tareas asignadas y evitar retrasos en la producción, garantizando así la operatividad y eficiencia de las embarcaciones.
- Medir las vibraciones de los equipos industriales de la Armada o de terceros, alcanzando un mínimo de 2080 horas anuales de trabajo.

PASO N°2: Establecer los Factores de Utilización.

- El estado de funcionamiento de ambos equipos es a su máxima capacidad, realizando mediciones continuas y detalladas de vibraciones en múltiples embarcaciones y equipos en períodos de jornada completa de 8 horas al día y durante 5 días a la semana.

PASO N°3: Identificar las Alternativas Disponibles.

- Las opciones de evaluación para los equipos de análisis de vibraciones se detallan en la siguiente tabla, que incluye una comparación de proveedores, vida útil y tasa de interés asociada a cada equipo (Tabla 3-2):

Tabla 3-2: Equipos de vibraciones en evaluación.

Opciones	Equipo	Proveedores	Vida útil Según(S.I.I.)	Tasa interés
Opción 1	FALCON ULTIMATE WLS PACK	Sociedad de representaciones y servicios C.S.T	10 años	10%
Opción 2	Analizador SKF Microlog CMV90-M-CK-SL	QUALITY BEARINGS	10 años	10%

Fuente: Tabla de elaboración propia

PASO N°4: Identificar las Categorías de Costes.

Opción N°1: Equipo de vibraciones (FALCON ULTIMATE WLS PACK).

- En la siguiente tabla se presentan las distintas categorías de costos asociados con la adquisición del equipo de análisis de vibraciones (FALCON ULTIMATE WLS PACK) (Ver Tabla 3-3). El análisis revela que la mayor proporción de los costos proviene de los costos operacionales y la inversión inicial, como se detalla a continuación:

Tabla 3-3: Categoría de costos del equipo de vibraciones Falcon WLS Pack.

		\$/Año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Opción N°1: Equipo FALCON ULTIMATE WLS PACK	\$37.580.180	\$37.580.180
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$15.009.684	\$16.676.351
	Costos por capacitación	\$1.666.667	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Actualización de software por 5 licencias	\$12.367.240	\$12.367.240
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazo de batería	\$29.750	\$29.750
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de vibraciones (SKF Microlog CMV90-M-CK-SL).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados con la opción N°2 correspondiente al equipo análisis de vibraciones (SKF Microlog CMV90-M-CK-SL), en donde se diferencia que los costos operacionales y costos de mantenimiento preventivo representan la mayor proporción de costos (Ver Tabla 3-4).

Tabla 3-4: Categoría de costos del equipo de vibraciones SKF CMV90.

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°2: Analizador SKF Microlog CMV90-M-CK-SL	\$52.428.871	\$52.428.871
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$15.009.684	\$16.676.351
	Costos por capacitación	\$ 1.666.667	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Actualización de software por 05 licencias	\$9.598.800	\$9.598.800
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazo de batería	\$ 29.750	\$29.750
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°5: Determinar los costes por confiabilidad (TCPF).

PASO N°6: Determinar los costes críticos.

Opción N°1: Equipo de vibraciones (FALCON ULTIMATE WLS PACK).

- La siguiente tabla desglosa los costos por confiabilidad asociados a los modos de falla más relevantes para el equipo N°1 (FALCON ULTIMATE WLS PACK) (Ver Tabla 3-5). Cada tipo de falla se evalúa según su frecuencia esperada (δf =frecuencia de fallo constante), el tiempo promedio para reparar (MTTR) y costos por pérdida de producción (En nuestro caso se considera como pérdida de producción al especialista sin poder producir). También se incluye el (PASO N°6) en la selección del modo de falla más crítico, en el cual nos indica que el (transductor dañado) posee el mayor costo por fallo.

Tabla 3-5: Tabla de Costos por confiabilidad del equipo Falcon WLS PACK.

Costos por confiabilidad		TCPF	Equipo N°1: FALCON ULTIMATE WLS PACK			
1) Definir tipos de fallos f=1			Tipo de falla		N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)			Cable de cargador dañado		2	0,2
			Cable de sonda dañado		2	0,2
			Transductor dañado		1	0,1
3) Calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Cable de cargador dañado	40	\$ 83.300	\$ 416.500	\$ 22.500	\$ 522.300	\$ 20.892.000
Cable de sonda dañado	40	\$ 83.300	\$ 476.000	\$ 22.500	\$ 581.800	\$ 23.272.000
Transductor dañado	40	\$ 83.300	\$ 3.812.254	\$ 22.500	\$ 3.918.054	\$ 156.722.170
4) calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Cable de cargador dañado	\$4.178.400				
	Cable de sonda dañado	\$4.654.400				
	Transductor dañado	\$ 15.672.217				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de vibraciones (SKF Microlog CMV90-M-CK-SL).

- La siguiente tabla presenta los costos por confiabilidad asociados a la opción N°2 de vibraciones (SKF Microlog CMV90-M-CK-SL). Se identifica que el costo por falla que representa mayor impacto es del transductor dañado nuevamente, seguido de los costos por sonda dañada (Ver tabla 3-6). Ambos tipos de fallo presentan características similares a la opción N°1 debido a que es un equipo de pocos componentes, pero de alto factor de riesgo de falla.

Tabla 3-6: Costos por confiabilidad del equipo de vibraciones SKF CMV90.

Costos por confiabilidad	TCPF	Equipo N°2: Analizador SKF Microlog CMV90-M-CK-SL				
1) Definir tipos de fallos f=1		Tipo de falla	Nº de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]		
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)		Cable de cargador dañado	2	0,2		
		Cable de sonda dañado	2	0,2		
		Transductor dañado	1	0,1		
3) calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Cable de cargador dañado	40	\$ 83.300	\$ 226.100	\$ 22.500	\$ 331.900	\$ 13.276.000
Cable de sonda dañado	40	\$ 83.300	\$ 235.738	\$ 22.500	\$ 341.538	\$ 13.661.512
Transductor dañado	40	\$ 83.300	\$ 2.261.000	\$ 22.500	\$ 2.366.800	\$ 94.672.000
4) Calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Cable de cargador dañado	\$ 2.655.200				
	cable de sonda dañado	\$ 2.732.302				
	Transductor dañado	\$ 9.467.200				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente.

- A continuación, se emplea la ecuación (2.7) para calcular el valor presente correspondiente a los fallos de ambos equipos (Ver Tabla 3-7).

Tabla 3-7: Costos de valor presente de los fallos de la opción 1 y 2.

Calcular los costos en valor presente	Opción N°1: Equipo FALCON ULTIMATE WLS PACK		Equipo N°2: Analizador SKF Microlog CMV90-M-CK-SL	
Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente(PTCP)
Cable de cargador dañado	\$4.178.400	\$ 25.674.459	\$ 2.655.200	\$ 16.315.055
Cable de sonda dañado	\$ 4.654.400	\$ 28.599.273	\$ 2.732.302	\$ 16.788.816
Transductor dañado	\$ 15.672.217	\$ 96.298.989	\$ 9.467.200	\$ 58.171.846
	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)	\$ 150.572.721	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)	\$ 91.275.716

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°8: Seleccionar la alternativa ganadora.

- A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la evaluación ACCV, donde comparamos los costos asociados a cada equipo de vibraciones llevados a valor presente (Ver Tabla 3-8).
- Los resultados indican que, aunque el equipo FALCON tiene un costo inicial de adquisición más bajo, su costo total de ciclo de vida es mucho mayor al del equipo SKF. Esto es debido a los costos por confiabilidad que representan un factor considerable para la elección de estas dos opciones.
- Un análisis adicional destaca que los costos por confiabilidad tienen un peso significativo en esta decisión. Lo que significa que: Por cada mil pesos invertidos el equipo FALCON, se destina 400 pesos a cubrir costos por confiabilidad. Mientras el equipo SKF destina 290 pesos, lo que lo hace más eficiente en términos de confiabilidad.
- La elección del equipo N°2 (SKF Microlog CMV90-M-CK-SL) se posiciona como la opción ganadora reflejando el impacto considerable de los costos por confiabilidad y por mantenciones preventivas.

Tabla 3-8: ACCV de los equipos de vibraciones de la opción N°1 y N°2.

	<i>Equipos</i>	
	Equipo N°1: FALCON ULTIMATE WLS PACK	Equipo N°2: Analizador SKF Microlog CMV90-M-CK-SL
Costos totales del ciclo de vida	Costos totales en valor presente (tasa interés 10% en un periodo de vida de 10 años)	
CI: Coste inicial de adquisición e instalación	\$44.720.414	\$62.390.356
CO: Costos operacionales anuales	\$ 102.468.956	\$102.468.956
CMP: Costos de mantenimiento preventivo anual.	\$ 75.991.336	\$58.980.471
CMM: Costos de mantenimiento mayor	\$ 182.801	\$645.180
TPCf: Costos totales por confiabilidad (fallos)	\$ 150.572.721	\$91.275.716
VR: Valor de reposición.	-	-
CTCV(P): costos totales de ciclo de vida	\$373.936.228	\$ 315.760.679
Ahorro potencial CTV(P)	\$58.175.549	
% Costos por confiabilidad sobre los costos totales en valor presente	40%	29%

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

3.2. B- EVALUACIÓN DEL ACCV PARA LOS EQUIPOS DE ULTRASONIDO

3.2.1. Procedimiento

PASO N°1: Establecer las condiciones operacionales del sistema.

- El equipo de ultrasonido opera de manera continua debido a las demandas constantes de los clientes para inspecciones y mantenimiento. Estos equipos son esenciales para monitorear la integridad de diversas estructuras y maquinaria. La toma de mediciones precisa y oportuna es crucial para cumplir con las tareas asignadas y evitar fallos inesperados, garantizando así la seguridad y eficiencia operativa.
- El equipo debe realizar un monitoreo continuo de las estructuras y maquinaria en busca de irregularidades o fallos, generando informes y análisis detallados, y alcanzando un mínimo de 2080 horas de trabajo anuales.

PASO N°2: Establecer los factores de utilización.

- El estado de funcionamiento del equipo es a su máxima capacidad, realizando inspecciones continuas en múltiples estructuras y equipos durante 8 horas al día, 5 días a la semana como mínimo.

PASO N°3: Identificar las alternativas disponibles.

- La tabla siguiente presenta las dos opciones de equipos de ultrasonido evaluadas (Ver Tabla 3-9). Ambos equipos tienen una vida útil proyectada de 10 años y una tasa de interés aplicada del 10%. Esto permite realizar una comparación homogénea entre las alternativas bajo los mismos parámetros técnicos y económicos.

Tabla 3-9: Equipos de ultrasonido.

Opciones	Equipo	Proveedores	Vida útil según(S.I.I.)	Tasa interés
Opción 1	Equipo de ultrasonido DMS GO	Servige	10 años	10%
Opción 2	Equipo ultrasonido KT-310	Profan LTDA.	10 años	10%

Fuente: Tabla de elaboración propia

PASO N°4: Identificar las Categorías de Costes Básicos.

Opción N°1: Equipo de ultrasonido (DMS GO).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados para la adquisición del equipo N°1 de análisis de ultrasonido (DMS GO) (Ver Tabla 3-10). Este análisis proporciona una visión integral de los costos que impactan el ciclo de vida del equipo, identificando áreas clave que podrían beneficiarse de estrategias de optimización, como la reducción de costos operativos y el fortalecimiento de la confiabilidad.

Tabla 3-10: Categoría de costos del equipo ultrasonido DMS GO.

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°1:Equipo de ultrasonido DMS GO	\$ 17.026.823	\$17.026.823
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$ 15.009.684	\$19.169.684
	Costos por capacitación	\$ 4.160.000	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Calibración	\$ 220.000	\$ 220.000
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazar 2 veces la batería del equipo en 10 años	\$ 241.577	\$ 241.577
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de ultrasonido (KT-310).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados para la adquisición del equipo N°2 de análisis de ultrasonido (KT-310). El análisis demuestra que los costos operacionales representan el mayor porcentaje del total costos, seguidos por los costos de mantenimiento preventivo (Ver Tabla 3-11).

Tabla 3-11: Categoría de costos del equipo ultrasonido Microlog CMV90.

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°2: Analizador SKF Microlog CMV90-M-CK-SL	\$2.109.665	\$2.109.665
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$ 15.009.684	\$ 19.169.684
	Costos por capacitación	\$ 4.160.000	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Actualización de software por 05 licencias	\$ 9.598.800	\$9.598.800
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazo de batería	\$ 29.750	\$29.750
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°5: Determinar los costes por confiabilidad (TCPF).

PASO N°6: Determinar los costes críticos.

Opción N°1: Equipo de ultrasonido (DMS GO).

- A continuación, determinamos los costos por confiabilidad (TCP_f) asociados a los modos de fallas más significativos y probables que han ocurrido en equipos anteriores de similares marcas de ultrasonido para ser evaluados en el (DMS GO) (Ver Tabla 3-10). Este análisis evidencia que el transductor en mal estado tiene el mayor impacto financiero entre los modos de falla evaluados (Ver Tabla 3-12).

Tabla 3-12: Costos por confiabilidad del equipo de ultrasonido DMS GO.

Costos por confiabilidad		TCPF	Equipo N°1:Equipo de ultrasonido DMS GO			
1) Definir tipos de fallos f=1			Tipo de falla	N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]	
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)			Cable de sonda dañado	2	0,2	
			Cable de carga dañado	1	0,1	
			Transductor en mal estado	1	0,1	
3) calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Cable de sonda dañado	40	\$ 83.300	\$ 477.253	\$ 22.500	\$ 583.053	\$ 23.322.123
Cable de carga dañado	40	\$ 83.300	\$ 357.000	\$ 22.500	\$ 462.800	\$ 18.512.000
Transductor en mal estado	40	\$ 83.300	\$ 1.852.392	\$ 22.500	\$ 1.958.192	\$ 78.327.683
4) Calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Cable de sonda dañado	\$ 4.664.425				
	Cable de carga dañado	\$ 1.851.200				
	Transductor en mal estado	\$ 7.832.768				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de ultrasonido (KT-310).

- A continuación, determinamos los costos por confiabilidad (TCP_f) asociados a los modos de fallas más significativos y probables que han ocurrido en equipos anteriores de ultrasonido (Ver Tabla 3-13). El análisis revela que el cable de sonda dañado es el principal componente crítico en términos de costos por confiabilidad, seguido por el transductor en mal estado. Además, se observa que la frecuencia de fallas de estos componentes es mayor en comparación con la opción N°1.

Tabla 3-13: Costos por confiabilidad del equipo de ultrasonido KT-310.

Costos por confiabilidad		TCPF	Equipo N°2: Equipo ultrasonido KT-310			
1) Definir tipos de fallos f=1			Tipo de falla	N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]	
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)			Cable de sonda dañado	3	0,3	
			Cable de carga dañado	2	0,2	
			Transductor en mal estado	4	0,4	
3) calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Cable de sonda dañado	40	\$ 58.506	\$ 505.925	\$ 22.500	\$ 586.931	\$ 23.477.237
Cable de carga dañado	40	\$ 83.300	\$ 297.500	\$ 22.500	\$ 403.300	\$ 3.226.400
Transductor en mal estado	40	\$ 50.083	\$ 142.800	\$ 22.500	\$ 215.383	\$ 3.446.128
4) calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Cable de sonda dañado	\$ 7.043.171				
	Cable de carga dañado	\$ 645.280				
	Transductor en mal estado	\$ 1.378.451				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente.

- A continuación, se emplea la ecuación (2.7) para calcular el valor presente correspondiente a los fallos de ambos equipos (Ver Tabla 3-14).

Tabla 3-14: Costos de valor presente de los fallos de la opción 1 y 2.

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente	Equipo N°1:Equipo de ultrasonido DMS GO		Equipo N°2: Equipo ultrasonido KT-310	
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)
	Cable de sonda dañado	\$ 4.664.425	\$ 28.660.870	\$ 7.043.171
	Cable de carga dañado	\$1.851.200	\$ 11.374.823	\$ 645.280
	Transductor en mal estado	\$ 7.832.768	\$ 48.128.971	\$ 1.378.451
		Costos totales por confiabilidad en valor presente(PTCP)	\$ 88.164.663	Costos totales por confiabilidad en valor presente(PTCP)
				\$ 55.712.190

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°8: Seleccionar la alternativa ganadora.

- En este paso, se presenta la evaluación comparativa de ambas opciones de ultrasonido, DMS GO y KT-310, utilizando la ecuación descrita por Woodward (ecuación 2.3).
- El equipo DMS GO presenta un costo inicial significativamente mayor en comparación con el KT-310, generando una diferencia total de costos de \$50.101.482 a lo largo de su ciclo de vida. Este análisis resalta al KT-310 como la alternativa más económica, principalmente debido a sus menores costos de adquisición y confiabilidad, los cuales tienen un impacto considerable en los costos totales del ciclo de vida (Ver Tabla 3-15).
- Aunque el KT-310 tiene una frecuencia de fallas más elevada en comparación con el DMS GO, sigue siendo la opción más favorable desde el punto de vista económico. Finalmente, el porcentaje de inversión por cada mil pesos en estos equipos revela que el (DMS GO) asigna el 38% (380 pesos) a los costos por fallas, mientras que el (KT-310) asigna el 31% (310 pesos) a estos costos.

Tabla 3-15: ACCV de los Equipos de ultrasonido.

	<i>Equipos</i>	
	Equipo N°1:Equipo de ultrasonido DMS GO	Equipo N°2: Equipo ultrasonido KT-310
Costos totales del ciclo de vida	Costos totales en valor presente (tasa interés 10% en un periodo de vida de 10 años)	
CI: Coste inicial de adquisición e instalación	\$20.261.919	\$ 2.510.501
CO: Costos operacionales anuales	\$117.789.410	\$117.789.410
CMP: Costos de mantenimiento preventivo anual.	\$1.351.805	\$1.351.805
CMM: Costos de mantenimiento mayor	\$1.484.383	\$1.187.507
TPCf: Costos totales por confiabilidad (fallos)	\$88.164.663	\$55.712.190
VR: Valor de reposición.	-	-
CTCV(P): costos totales de ciclo de vida	\$229.052.180	\$ 178.551.413
Ahorro potencial CTV(P)	\$ 50.500.768	
% Costos por confiabilidad sobre los costos totales en valor presente	38%	31%

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

3.3. C- EVALUACIÓN DE ACCV PARA LOS EQUIPOS DE BOROSCOPIA INDUSTRIAL

3.3.1. Procedimiento

PASO N°1: Establecer las condiciones operacionales del sistema.

- Al no contar con un equipo de respaldo, es indispensable adquirir un nuevo equipo que permita mantener la continuidad operativa y prevenir interrupciones en las inspecciones. Además, el equipo también se utiliza como un instrumento de apoyo para otras áreas de la planta, ampliando su alcance de operación y justificación para trabajar a máxima capacidad.
- El equipo debe ser adquirido para funcionar como instrumento de inspección visual en las instalaciones y buques de la armada, garantizando una resolución de imagen mínima de 720p para detectar posibles defectos en tiempo real y evitar fallos operativos, con un desempeño continuo y sin interrupciones en las inspecciones solicitadas.

PASO N°2: Establecer los Factores de Utilización.

- El equipo opera de manera continua, realizando inspecciones durante 8 horas al día, 5 días a la semana como mínimo, lo que implica un nivel de utilización máximo. Este factor refuerza la necesidad de que el equipo sea confiable y eficiente para cumplir con los altos requerimientos operativos.

PASO N°3: Identificar las Alternativas Disponibles.

- Las alternativas disponibles para la evaluación de los equipos de boroscopia industrial se presentan a continuación (Ver Tabla 3-16), detallando los modelos, proveedores, vida útil estimada y tasa de interés aplicable.

Tabla 3-16: Equipos de boroscopia.

Opciones	Equipo	Proveedores	Vida útil según(S.I.I.)	Tasa interés
Opción 1	Boroscopio Olympus Iplex RX4	GP Technical	10 años	10%
Opción 2	Boroscopio SVG C-19	Servige	10 años	10%

Fuente: Tabla de elaboración propia

PASO N°4: Identificar las Categorías de Costes Básicos.

Opción N°1: Equipo de boroscopia (Olympus RX4).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados para la adquisición del equipo N°1 de boroscopia (Olympus RX4) (Ver Cuadro 3-17). En este balance, podemos observar que la mayor parte de los costos son absorbidos por los costos operacionales, seguidos por los costos de mantenimiento preventivo.

Tabla 3-17: Categoría de costos del equipo Boroscopio Olympus RX4.

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°1: Boroscopio Olympus Iplex RX4	\$17.687.918	\$17.687.918
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$15.009.684	\$ 16.676.351
	Costos por capacitación	\$ 1.666.667	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Costos de calibración	\$ 220.000	\$220.000
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazar 2 veces la batería del equipo en 10 años	\$ 2.684.183	\$ 2.684.183
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de boroscopia (SVG C-19).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados para la adquisición del equipo N°2 de boroscopia (SVG C-19). En este balance, podemos observar que la mayor parte de los costos son absorbidos por los costos operacionales y los costos de mantenimiento preventivo (Ver Tabla 3-18).

Tabla 3-18: Categoría de costos del equipo Boroscopio SVG C-19

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°2: Boroscopio SVG C-19	\$19.731.152	\$19.731.152
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$15.009.684	\$16.676.351
	Costos por capacitación	\$1.666.667	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Actualización de software por 05 licencias	\$ 220.000	\$ 220.000
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazo de batería	\$268.418	\$268.418
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°5: Determinar los costes por confiabilidad (TCPF).

PASO N°6: Determinar los costes críticos.

Opción N°1: Equipo de boroscopia (Olympus RX4).

- En la siguiente tabla se evalúan los costos por confiabilidad (TCPf) asociados a los modos de falla más relevantes del equipo N°1 de boroscopia (Olympus RX4). Aunque la frecuencia de fallas y el número de eventos registrados son relativamente bajos en comparación con la vida útil del equipo, los costos derivados de estas fallas representan un factor significativo a considerar al evaluar el impacto de posibles fallos durante su ciclo de vida. Esto se debe a que, aunque ocurren con poca frecuencia, su reparación o sustitución implica gastos elevados que afectan significativamente la evaluación financiera y de confiabilidad del equipo (Ver Tabla 3-19).

Tabla 3-19: Costos por confiabilidad del equipo de boroscopia Olympus RX4.

Costos por confiabilidad	TCPF	Equipo N°1: Boroscopio Olympus Iplex RX4				
1) Definir tipos de fallos f=1		Tipo de falla		N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]	
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)		Cable de sonda dañado		1	0,1	
		Cable de cargador dañado		1	0,1	
		Cámara de sonda dañada		2	0,2	
3) calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Cable de sonda dañado	40	\$ 140.000	\$ 2.975.000	\$ 22.500	\$ 3.137.500	\$ 125.500.000
Cable de cargador dañado	40	\$ 140.000	\$ 702.100	\$ 22.500	\$ 864.600	\$ 34.584.000
Cámara de sonda dañada	40	\$ 140.000	\$ 1.852.392	\$ 22.500	\$ 2.014.892	\$ 80.595.683
4) Calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Cable de sonda dañado	\$ 12.550.000				
	Cable de cargador dañado	\$ 3.458.400				
	Cámara de sonda dañada	\$ 16.119.137				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de boroscopia (SVG C-19).

- A continuación, determinamos los costos por confiabilidad (TCPF) asociados a los modos de fallas más significativos y probables que han ocurrido en equipos anteriores de boroscopia SVG-C19. Acá se identifica que el costo por fallo de mayor impacto lo representa el cable de sonda dañado, seguido del cable de cámara dañado. Este factor de costos es influenciado principalmente por los repuestos del equipo. Se identifica claramente que el fallo más crítico para este equipo es el cable de sonda dañado como se muestra en la siguiente tabla (Ver Tabla 3-20):

Tabla 3-20: Categoría de costos del equipo Boroscopio SVG-C19

Costos por confiabilidad	TCPF	Equipo N°2: Boroscopio SVG C-19				
1) Definir tipos de fallos f=1		Tipo de falla		N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]	
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)		Cable de sonda dañado		1	0,1	
		Cable de carga dañado		1	0,1	
		Cámara de sonda dañado		1	0,1	
3) Calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Cable de sonda dañado	40	\$ 140.000	\$ 16.760.454	\$ 22.500	\$ 16.922.954	\$ 676.918.154
Cable de carga dañado	40	\$ 140.000	\$ 535.500	\$ 22.500	\$ 698.000	\$ 27.920.000
Cámara de sonda dañado	40	\$ 140.000	\$ 4.165.000	\$ 22.500	\$ 4.327.500	\$ 173.100.000
4) Calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Cable de sonda dañado	\$ 67.691.815				
	Cable de carga dañado	\$ 2.792.000				
	Cámara de sonda dañado	\$ 17.310.000				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente.

- A continuación, se emplea la ecuación (2.7) para calcular el valor presente correspondiente a los fallos de ambos equipos (Ver Tabla 3-21).

Tabla 3-21: Costos de valor presente de los fallos de la opción 1 y 2.

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente	Equipo N°1: Boroscopio Olympus Iplex RX4		Equipo N°2: Boroscopio SVG C-19	
Cable de sonda dañado	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)
Cable de sonda dañado	\$ 12.550.000	\$ 77.114.317	\$ 67.691.815	\$ 415.936.902
Cable de cargador dañado	\$ 3.458.400	\$ 21.250.371	\$ 2.792.000	\$ 17.155.631
Cámara de sonda dañada	\$ 16.119.137	\$ 99.045.117	\$ 17.310.000	\$ 106.362.457
	Costos totales por fallo en valor presente	\$ 197.409.805	Costos totales por fallo en valor presente	\$ 539.454.990

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°8: Seleccionar la alternativa ganadora.

- En la siguiente tabla (Ver Tabla 3-22), se presenta un resumen del análisis de costos del ciclo de vida ACCV de dos equipos de boroscopia evaluados según las categorías de costos establecidas en el modelo de Woodward. Este análisis considera los costos de adquisición, operativos, mantenimiento y confiabilidad, permitiendo una comparación integral para identificar la opción más viable desde el punto de vista técnico y económico.
- En este caso, se observa una marcada diferencia en los costos asociados a la confiabilidad entre ambos equipos. Esta disparidad se debe principalmente al elevado costo de los repuestos críticos, como la cámara y la sonda, del boroscopio SVG C-19, cuyo valor se aproxima al costo de adquisición inicial, lo que lo convierte en una opción desfavorable tanto técnica como económicamente. Por el contrario, el boroscopio Olympus RX4 se posiciona como la opción más factible, con un ahorro potencial de \$344.835.589, lo que lo establece como la alternativa ganadora.
- Además, los porcentajes relativos a los costos de confiabilidad sobre los costos totales refuerzan esta conclusión. Por cada mil pesos invertidos, el equipo N°1 destina 58% (580 pesos) a costos por confiabilidad, mientras que en el equipo N°2, esta proporción asciende al 79% (790 pesos), reflejando un impacto económico significativamente mayor debido a los costos por falla.

Tabla 3-22: ACCV de los equipos de boroscopia.

	<i>Equipos</i>	
	Equipo N°1: Boroscopio Olympus Iplex RX4	Equipo N°2: Boroscopio SVG C-19
Costos totales del ciclo de vida	Costos totales en valor presente (tasa interés 10% en un periodo de vida de 10 años)	
CI: Coste inicial de adquisición e instalación	\$21.048.622	\$23.480.071
CO: Costos operacionales anuales	\$102.468.956	\$102.468.956
CMP: Costos de mantenimiento preventivo anual.	\$1.351.805	\$1.351.805
CMM: Costos de mantenimiento mayor	\$ 1.290.359	\$1.649.314
TPCf: Costos totales por confiabilidad (fallos)	\$197.409.805	\$539.454.990
VR: Valor de reposición.	-	-
CTCV(P): costos totales de ciclo de vida	\$ 323.569.547	\$668.405.136
Ahorro potencial CTV(P)	\$344.835.589	
% Costos por confiabilidad sobre los costos totales en valor presente	61%	81%

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

3.4. D - EVALUACIÓN DEL ACCV PARA EQUIPOS ALINEAMIENTO LÁSER

3.4.1. Procedimiento

PASO N°1: Establecer las condiciones operacionales del sistema.

- Actualmente solo quedan dos equipos de alineamiento láser, debido a que un tercero fue dado de baja por estar discontinuado y ya no contar con repuestos ni calibración. La alta demanda para el uso de estos equipos genera una necesidad operativa crucial por parte del taller de control de calidad. Por estos motivos se ha dado la opción de evaluar equipos de alineamiento láser que cumplan con las expectativas técnicas- económicas, además de satisfacer las altas demandas solicitadas por las embarcaciones de la Armada. Estos equipos operan a máxima capacidad cumpliendo con tareas líderes y tareas mayas.
- Los equipos de alineamiento láser deben funcionar alcanzando una precisión mínima de 0.01 mm para garantizar la alineación correcta de los componentes, operando a máxima capacidad para cumplir con las demandas de mantenimiento y alineación de las embarcaciones de la Armada y servicios externos.

PASO N°2: Establecer los factores de utilización.

- El estado de funcionamiento del equipo es a su máxima capacidad, con requerimiento de alineamientos continuos durante 8 horas al día, 5 días a la semana.

PASO N°3: Identificar las Alternativas Disponibles.

- Las opciones de evaluación de los equipos de alineamiento se presentan en la siguiente tabla (Ver Tabla 3-23)

Tabla 3-23: Equipos de alineamiento láser.

Opciones	Equipo	Proveedores	Vida útil según(S.I.I.)	Tasa interés
Opción 1	Equipo N°1: Alineador láser XT660SD Medium	GP Técnica	10 años	10%
Opción 2	Equipo N°2: Alineador láser Fixturlaser NXA	Servige	10 años	10%

Fuente: Tabla de elaboración propia

PASO N°4: Identificar las Categorías de Costes Básicos:

Opción N°1: Equipo de alineamiento (XT660SD).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados para la adquisición del equipo N°1 de alineamiento láser (XT660SD). En este balance, podemos observar que la mayor parte de los costos son absorbidos por los costos operacionales, seguidos por los costos de mantenimiento mayor (Ver Tabla 3-24).

Tabla 3-24: Categoría de costos del equipo alineamiento láser XT660SD.

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°1: Alineador láser XT660SD Medium	\$16.162.682	\$16.162.682
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$15.009.684	\$16.676.351
	Costos por capacitación	\$1.666.667	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Costos de mantenimiento preventivo	\$180.000	\$180.000
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costos de mantenimiento mayor	\$342.000	\$342.000
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de alineamiento (XT660SD).

- En la siguiente tabla se presentan las diferentes categorías de costos asociados para la adquisición del equipo N°2 de alineamiento láser (Fixturlaser NXA). Este análisis permite identificar las áreas de mayor impacto económico en el ciclo de vida del equipo, destacando que los costos operacionales son la categoría predominante, seguidos por los costos de mantenimiento preventivo (Ver Tabla 3-25).

Tabla 3-25: Categoría de costos del equipo alineamiento Fixturlaser NXA.

		\$/año	Total de costos al año
Costos de inversión (CI)	Equipo N°2: Alineador láser Fixturlaser NXA	\$19.731.152	\$19.731.152
Costos operacionales (CO)	Costo al año por especialista	\$15.009.684	\$16.676.351
	Costos por capacitación	\$1.666.667	
Costos de mantenimiento preventivo (CMP)	Actualización de software por 05 licencias	\$204.000	\$1.253.492
Costos de mantenimiento mayor (CMM)	Costo por reemplazo de batería	\$ 301.200	\$1.850.744
Valor de reposición (VR)	Desperdicio/venta	-	-

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°5: Determinar los costes por confiabilidad (TCPF).

PASO N°6: Determinar los costes críticos.

Opción N°1: Equipo de alineamiento (XT660SD).

- A continuación, se determinan los costos por confiabilidad (TCPF) asociados a los modos de falla más significativos y probables ocurridos en equipos de alineamiento anteriores. Se identificó que los costos relacionados con la falla del transmisor láser y los soportes presentan valores similares en cuanto al costo de repuestos. Sin embargo, debido a la mayor frecuencia de fallas, los soportes resultan ser el componente con el fallo más costoso para este equipo (Ver Tabla 3-26)

Tabla 3-26: Costos por confiabilidad del equipo de alineamiento láser XT660SD.

Costos por confiabilidad		TCPF	Equipo N°1: Alineador láser XT660SD Medium			
1) Definir tipos de fallos f=1		Tipo de falla	N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]		
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)		Transmisor laser dañado	1	0,1		
		Cable de cargador dañado	2	0,2		
		Soportes dañados	2	0,2		
3) Calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Transmisor laser dañado	40	\$ 125.000	\$ 3.213.000	\$ 22.500	\$ 3.360.500	\$ 134.420.000
Cable de cargador dañado	40	\$ 125.000	\$ 690.200	\$ 22.500	\$ 837.700	\$ 33.508.000
Soportes dañados	40	\$ 125.000	\$ 3.391.500	\$ 22.500	\$ 3.539.000	\$ 141.560.000
4) Calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Transmisor laser dañado	\$ 13.442.000				
	Cable de cargador dañado	\$ 6.701.600				
	Soportes dañados	\$ 28.312.000				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

Opción N°2: Equipo de alineamiento (XT660SD).

- A continuación, se determinan los costos por confiabilidad (TCPF) asociados a los modos de falla más significativos y probables registrados en equipos de alineamiento anteriores. Se concluye que el modo de falla del transmisor dañado representa el factor de mayor impacto en los costos, debido a la combinación del alto costo del repuesto y la frecuencia de ocurrencia de este tipo de falla (Ver Tabla 3-27).

Tabla 3-27: Categoría de costos por confiabilidad del equipo Fixturlaser NXA.

Costos por confiabilidad	TCPF	Equipo N°2: Alineador láser Fixturlaser NXA				
1) Definir tipos de fallos f=1		Tipo de falla		N° de evento en 10 años	Frecuencia de fallas [δf = Fallas al/año]	
2) Definir frecuencia de fallos (δf = Fallas al/año)		Transmisor laser dañado		2	0,2	
		Cable de cargador dañado		1	0,1	
		Soportes dañados		2	0,2	
3) Calcular costos de cada falla (Cf =\$/fallo)						
Tipo de falla	Tiempo promedio para reparar (MTTR) horas/falla	Costo de envío \$	Costo de repuesto \$	Costos por pérdida de producción \$/hora	Costo penalización (Cpef) \$/hora	Costo por fallo (Cf) \$/fallo
Transmisor laser dañado	40	\$ 140.000	\$ 2.142.000	\$ 22.500	\$ 2.304.500	\$ 92.180.000
Cable de cargador dañado	40	\$ 140.000	\$ 416.500	\$ 22.500	\$ 579.000	\$ 23.160.000
Soportes dañados	40	\$ 140.000	\$ 553.350	\$ 22.500	\$ 715.850	\$ 28.634.000
4) Calcular costos totales (TCP = fallo / año)						
	Tipo de falla	Costos totales por fallo (TCP)				
	Transmisor láser dañado	\$ 18.436.000				
	Cable de cargador dañado	\$ 2.316.000				
	Soportes dañados	\$ 5.726.800				

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente.

- A continuación, se emplea la ecuación (2.7) para calcular el valor presente correspondiente a los costos por fallos (TCP) de ambos equipos (Ver Tabla 3-28).

Tabla 3-28: Costos de valor presente de los fallos de la opción 1 y 2.

PASO N°7: Calcular los Costos en valor presente	Equipo N°1: Alineador laser XT660SD Medium		Equipo N°2: Alineador laser Fixturlaser NXA	
	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)	Costos totales por fallo (TCP)	Costos totales por fallo en valor presente (PTCP)
	Transmisor laser dañado	\$ 13.442.000	\$ 18.436.000	\$ 113.281.239
	Cable de cargador dañado	\$ 6.701.600	\$ 2.316.000	\$ 14.230.817
	Soportes dañados	\$ 28.312.000	\$ 5.726.800	\$ 35.188.707
	Costos totales por confiabilidad (PTCP) en valor presente	\$ 297.738.686	Costos totales por confiabilidad (PTCP) en valor presente	\$ 162.700.763

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

PASO N°8: Seleccionar la alternativa ganadora.

- Para la elección del equipo de alineamiento láser, se determinó que la opción más factible en términos técnico-económico, fue el equipo N°2 (Fixturlaser NXA) debido a que posee los menores costos de confiabilidad en su ciclo de vida, con un ahorro potencial de \$130.894.672 en comparación con el equipo (XT660SD).
- Esta decisión se respalda en un análisis de desempeño en confiabilidad, donde se observa que por cada \$1.000 invertidos, el equipo XT660SD destina \$680 a costos por fallas, mientras que el Fixturlaser NXA solo asigna \$530, lo que indica una mejor eficiencia en términos de confiabilidad para este último.
- En la siguiente tabla se presenta el resumen del análisis de costos totales del ciclo de vida ACCV de los equipos de alineamiento láser (XT660SD y Fixturlaser NXA). Este análisis permite evaluar las categorías de costos de ciclo de vida, así como identificar el impacto de los costos por

confiabilidad en la decisión final, en donde identificamos que la opción ganadora corresponde al equipo N°2 (Alineador láser Ficturlaser NXA)(Ver Tabla 3-25).

Tabla 3-29: ACCV de los equipos alineamiento laser.

Categoría de costos "Woodward"	Equipo N°1: Alineador láser XT660SD Medium	Equipo N°2: Alineador láser Ficturlaser NXA
CI: Coste inicial de adquisición e instalación	\$19.233.592	\$ 23.480.071
CO: Costos operacionales anuales	\$ 117.789.410	\$117.789.410
CMP: Costos de mantenimiento preventivo anual.	\$ 1.106.022	\$1.253.492
CMM: Costos de mantenimiento mayor	\$2.101.442	\$ 1.850.744
TPCf: Costos totales por confiabilidad (fallos)	\$297.738.686	\$ 162.700.763
VR: Valor de reposición.	-	-
CTCV(P): costos totales de ciclo de vida	\$ 437.969.152	\$ 307.074.480
Diferencia	\$ 130.894.672	
% Costos por confiabilidad sobre los costos totales en valor presente	68%	53%

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

3.5. ANÁLISIS DE LOS EQUIPOS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO
EVALUADOS

La siguiente tabla resume el análisis técnico y económico basado en el modelo de Woodward [10],[11], evaluando las principales categorías de costos: inversión inicial, costos totales por confiabilidad y costos del ciclo de vida. Además, se calculó el ahorro potencial entre las alternativas comparadas, permitiendo identificar la opción más viable desde una perspectiva económica (Ver Tabla 3-26).

Tabla 3-30: Resumen ACCV evaluados.

A	Equipo N°1: FALCON ULTIMATE WLS PACK	Equipo N°2: Analizador SKF Microlog CMV90-M- CK-SL
Costos de inversión	\$ 44.720.414	\$ 62.390.356
Costos totales por confiabilidad	\$ 150.572.721	\$ 91.275.716
Costos de ciclo de vida	\$ 373.936.228	\$ 315.760.679
Ahorro potencial	\$ 58.175.549	
B	Equipo N°1:Equipo de ultrasonido DMS GO	Equipo N°2: Equipo ultrasonido KT-310
Costos de inversión	\$ 20.261.919	\$ 2.510.501
Costos totales por confiabilidad	\$ 88.164.663	\$ 55.712.190
Costos de ciclo de vida	\$ 229.052.180	\$ 178.551.413
Ahorro potencial	\$ 50.500.768	
C	Equipo N°1: Boroscopio Olympus Iplex RX4	Equipo N°2: Boroscopio SVG C-19
Costos de inversión	\$ 21.048.622	\$ 23.480.071
Costos totales por confiabilidad	\$ 197.409.805	\$ 539.454.990
Costos de ciclo de vida	\$ 323.569.547	\$ 668.405.136
Ahorro potencial	\$ 344.835.589	
D	Equipo N°1: Alineador laser XT660SD Medium	Equipo N°2: Alineador láser Fixturlaser NXA
Costos de inversión	\$ 19.233.592	\$ 23.480.071
Costos totales por confiabilidad	\$ 297.738.686	\$ 162.700.763
Costos de ciclo de vida	\$ 422.648.698	\$ 291.754.026
Ahorro potencial	\$ 130.894.672	

Fuente: Tabla de elaboración propia, en base al modelo de Woodward

3.5.1. Resumen final de la evaluación de los equipos de mantenimiento predictivo

- EQUIPO (FALCON ULTIMATE WLS PACK) VS. (EQUIPO ANALIZADOR SKF MICROLOG CMV90).

El análisis del ciclo de vida de ambos equipos muestra que el equipo N°1 (FALCON) es más económico en términos de adquisición inicial. Sin embargo, al evaluar los costos totales relacionados con la confiabilidad, el equipo N°2 (SKF) presenta un costo significativamente menor, con un total de \$91.275.716, en comparación con los \$150.572.721 del equipo N°1 (FALCON). Esto convierte al equipo N°2 (SKF) en la opción más rentable a largo plazo, permitiendo un ahorro potencial de \$58.175.549 al optar por esta alternativa, a pesar de su mayor inversión inicial. Es importante señalar que los costos de confiabilidad están determinados exclusivamente por los fallos y los costos de los repuestos.

- EQUIPO DE ULTRASONIDO DMS GO VS. EQUIPO ULTRASONIDO KT-310.

El análisis realizado revela una diferencia notable en los costos de adquisición entre los equipos evaluados. El equipo N°1 (DMS GO) tiene un costo inicial de \$20.261.919, mientras que el equipo N°2 presenta un costo significativamente menor de \$2.510.501. Esto convierte al equipo N°2 en una opción considerablemente más accesible en términos de inversión inicial. En relación con los costos asociados a la confiabilidad, el equipo N°1 sigue mostrando cifras más elevadas, con un total de \$88.164.663, en comparación con los \$55.712.190 del equipo N°2. Esto sugiere que, aunque el equipo N°2 presenta una mayor frecuencia de fallos, sus costos por repuestos y fallas son menores, lo que se traduce en un mejor desempeño global en términos de costos. Por último, al analizar los costos totales del ciclo de vida, el equipo N°2 se consolida como la alternativa más económica, con un costo total de \$178.551.413 frente a los \$229.052.180 del equipo N°1. Esta diferencia representa un ahorro potencial de \$50.500.768 al optar por el equipo N°2.

- EQUIPO BOROSCOPIO OLYMPUS IPLEX RX4 VS. EQUIPO BOROSCOPIO SVG C-19

Aunque los costos de inversión inicial entre ambos equipos de boroscopia no presentan diferencias significativas, el análisis revela que el factor con mayor impacto es el costo asociado a la confiabilidad. El equipo N°1 (Olympus Iplex RX4) tiene un costo de confiabilidad de \$197.409.805, mientras que el equipo N°2 (SVG C-19) alcanza un costo significativamente mayor, de \$539.454.990. Por último, el costo total del ciclo de vida para el equipo N°1 se estima en \$323.569.547, en contraste con los \$668.405.136 del equipo N°2. Esto representa un ahorro potencial de \$344.835.589 al optar por el equipo N°1, lo que lo convierte en la opción más rentable desde una perspectiva de costos.

- EQUIPO ALINEADOR LÁSER XT660SD MEDIUM VS. ALINEADOR LÁSER FIXTURLASER NXA.

El análisis comparativo entre el alineador láser N°1 (XT660SD) y el alineador láser N°2 (Fixturlaser NXA) destaca diferencias importantes, especialmente en términos de confiabilidad y costos asociados al ciclo de vida.

Un factor clave en la evaluación es la confiabilidad, donde el equipo N°2 sobresale al presentar costos asociados de \$162.700.763, considerablemente inferiores a los \$297.738.686 del equipo N°1. Esto evidencia que el equipo (Fixturlaser NXA) no solo ofrece un mejor rendimiento en términos de mantenimiento, sino que también reduce los gastos relacionados con fallas y repuestos, lo que lo posiciona como una opción más confiable.

En términos de factibilidad económica, el equipo N°2 (Fixturlaser NXA) se posiciona como la opción más viable, con un costo total de \$291.754.026 frente a los \$422.648.698 del equipo N°1 (XT660SD). Esta diferencia representa un ahorro potencial de \$130.894.672 al optar por el equipo N°2, consolidándose como una solución más económica y eficiente a largo plazo considerando que el equipo tiene mayor costo de adquisición.

CONCLUSIÓN

La implementación del procedimiento de Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV), utilizando el modelo de Woodward, ha demostrado ser una herramienta efectiva para optimizar la selección de tecnologías de mantenimiento predictivo en ASMAR Valparaíso. Este enfoque técnico-económico no solo responde a las necesidades inmediatas del taller de control de calidad (C-366), sino que también establece un marco estratégico replicable que asegura una gestión más eficiente de los recursos en el largo plazo.

El análisis detallado de los equipos evaluados en las categorías de vibraciones, ultrasonido, boroscopia y alineamiento láser, destacó la relevancia de considerar el costo total del ciclo de vida, en lugar de enfocarse únicamente en los costos iniciales. Los resultados de la evaluación demuestran lo siguiente:

- Equipos de vibraciones y alineamiento láser: La inversión en equipos más costosos mostró una viabilidad económica considerablemente mayor para un periodo de vida útil de 10 años, gracias a su menor frecuencia de fallos y mejores prestaciones a largo plazo.
- Equipos de ultrasonido: La evaluación del equipo de ultrasonido evidenció una marcada desigualdad en los costos de adquisición. Particularmente, el equipo de menor costo inicial (equipo N°2 de ultrasonido KT-310), presentó una frecuencia de fallos significativamente más alta, lo que afectó negativamente en su confiabilidad, pero a pesar esto, siguió siendo el equipo ganador. Estos nos hacen plantear que el nivel de confiabilidad respecto el costo de adquisición puede ser un factor para considerar en la elección de otro equipo que tenga un costo de adquisición similar para poder ser evaluado con respecto a este.
- Equipo de boroscopia: Este análisis evidenció cómo la confiabilidad influye directamente en los costos del ciclo de vida. Los costos asociados a fallos comprometen significativamente las decisiones de adquisición en esta categoría.

Desde una perspectiva metodológica, el modelo ACCV proporcionó una base sólida para evaluar de manera integral los aspectos técnicos y económicos de cada alternativa, lo que garantiza decisiones fundamentadas y transparentes. Además, el procedimiento propuesto promueve la mejora continua en los procesos de adquisición, posicionando al taller de control de calidad como un componente estratégico dentro de la cadena de valor de ASMAR(V).

Es importante destacar que las limitaciones que condicionaron el alcance y la precisión de este estudio fueron en primer lugar, debido al acceso limitado de información económica real, ya que algunos datos como las penalizaciones por inactividad o pérdida por fallas no fueron proporcionadas por el área administrativa. Esto obligo a trabajar con

estimaciones, afectando la exactitud de los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo de ACCV.

Otro factor limitante fue la ausencia de una evaluación de impacto ambiental y normativo asociado a la disposición final de los equipos evaluados. Al no considerar estos factores, ya sea con valores positivos o negativos, se incrementa el grado de incertidumbre en las decisiones de inversión. Por último, se reconoce que no existió el uso de software especializados o herramientas, cuya incorporación podría haber permitido una evaluación más precisa del comportamiento de los activos.

A pesar de esto, el procedimiento propuesto constituye una base sólida y de menor incertidumbre para la toma de decisiones en ASMAR y puede ser perfeccionada e implementada a mayor escala en otros talleres o áreas de la organización, mediante el fortalecimiento de la disponibilidad de datos y el uso de herramientas de análisis avanzado. Con ello, se reafirma el compromiso de ASMAR con la excelencia, la eficiencia y la innovación en un sector altamente exigente como la industria naval.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASMAR (V). Gestión del cambio [en línea]. <WWW.INSTRANET.CL> [consulta: 06/11/2019].
- [2] Woodward, D. G. 1997. “Life Cycle Costing - Theory, Information Acquisition and Application”, International Journal of Project Management, Vol. 15, No. 6, pp. 335-344.
- [3] Carlos Parra M. , Adolfo Crespo M. , Juan Gómez F., Vicente González P. Adolfo Arata Andrei, Fredy Kristjampoller R. . “Modelo estocástico de confiabilidad aplicado para evaluar el impacto económico de la falla en el ACCV”.[En línea]. Septiembre 2010. Pág:5. <<https://www.researchgate.net/publication/342702676>>, [consulta: 10- noviembre 2010].
- [4] Carlos Alberto Parra Márquez, Adolfo Crespo Márquez. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos. Segunda edición. INGEMAN. 2015.Pag 203. 978-84-95499-67.
- [5] NORMA ISO 5500. 2014. Gestión de activos-Sistemas de gestión-Requisitos. Pág.3. ICS 01.040.03;03.100.01.
- [6] Carlos Alberto Parra Márquez, Adolfo Crespo Márquez. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos. Segunda edición. INGEMAN. 2015.Pag 206. 978-84-95499-67.
- [7]Alejandro J. Pistarelli. Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Primera edición. 2010. - PÁG:46. 987-05-8420-G
- [8]Servicios de puestos internos .[En Línea]<www.Sii.cl> [Consulta: 01/01/2003].
- [9]NORMA EN 60300-3-3 2004. Gestión de la confiabilidad- guía de aplicación del cálculo costo de ciclo de vida. Pág.
- [10] John Woodhouse, Woodhouse Partnership, [En Línea],<<https://www.twpl.com/es/>> [consulta: 2023].
- [11] Carlos Parra, Análisis de costos de ciclo de vida y técnicas de confiabilidad costo riesgo beneficio [En Línea],< <https://cmc-latam.com/>> [consulta: 2011] ISSN 413422.

