

“Propuesta de Metodología Mixta de Análisis Para Optimizar Estrategia de Mantenimiento que
Impacte en los Costos y TTR de la Fragata Colombiana ARC Caldas”

Steven Martínez Olmos

Trabajo de Grado para Optar al Título de:

Maestría en Gerencia de Mantenimiento

Director

David Alfredo Fuentes Díaz

Doctor en Tecnología Energética

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A DIOS Todopoderoso, dueño de mi vida, mi propósito y mi destino. Gracias por darme fuerzas cuando las necesitaba, por renovarme en los momentos difíciles y por concederme la oportunidad de alcanzar esta meta que alguna vez soñé. Toda gloria, honra y honor sean para Ti.

Dedico este logro a mis tres pilares, quienes han sido instrumentos preciosos de Dios en mi vida. A mi madre, Dalis Olmos Yanes, por su amor incondicional y por sus enseñanzas que sembraron en mí el temor y el agradecimiento a Dios. Gracias por recordarme que no debía rendirme aun cuando las fuerzas parecían agotarse, por impulsarme a luchar por mis metas y sueños, y por mostrarme que con el poder de Dios todo es posible.

A mi hija, Gabriella Martínez, una de las más grandes bendiciones que Dios me ha regalado. Gracias por ser el motor que me inspira a levantarme cada día con más determinación, por tu inteligencia admirable y por la forma desinteresada en que compartes las bendiciones que Dios te concede. Eres motivo de orgullo y gratitud constante.

A Isabela Baquero, quien llegó a mi vida para traer luz, compartir sueños, logros y victorias, y unir fuerzas en los momentos en los que la vida pone a prueba nuestra fe en Dios y nuestra resiliencia. Gracias por tu apoyo, tu compañía y tu presencia en este camino.

Dedico especialmente este logro a la memoria de mi padrastro Arnaldo Enrique Beleño Ahumada (Q.E.P.D), quien, sin compartir mi sangre, me recibió desde muy pequeño como a un hijo, brindándome amor, apoyo, ejemplo y valores que han acompañado mi vida hasta hoy. Su cariño, entrega y confianza dejaron una huella imborrable en mi corazón y contribuyeron a la persona que soy. Elevo una oración para que Dios lo tenga en su santo reino y le conceda el descanso eterno.

“Hasta aquí nos ayudó Jehová” (1 Samuel 7:12).

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Ingeniero David Fuentes, quien, en calidad de director de este trabajo de grado, realizó una labor ejemplar. Su dedicación, su disposición constante para orientar y el tiempo invertido en enseñarme conceptos y procedimientos nuevos e interesantes fueron un aporte invaluable para culminar con éxito este proyecto. Su acompañamiento representó una guía firme y decisiva en cada etapa.

Extiendo también mi gratitud a mis compañeros de trabajo en COTECMAR, quienes aportaron su experiencia y conocimientos en la construcción y validación de la metodología mixta aplicada a la fragata ARC *Caldas*, al JTR Miguel Pastor, al jefe Rafael Bertel, al Ingeniero Yesid Gaviria y al Ingeniero Carlos Urzola, gracias por su apoyo, tiempo y aportes técnicos, que enriquecieron de manera significativa este trabajo.

Finalmente, me agradezco a Mí mismo por no rendirme ante las adversidades; por mantenerme firme pese al cansancio acumulado de viajes de más de quince horas cada quince días; por las noches de traspas dedicadas al avance de este proyecto; y por los sacrificios asumidos durante este proceso. Este logro es también el resultado de mi perseverancia, disciplina y fe.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	17
1.0 Planteamiento del problema.....	18
1.1 Objetivos.....	25
1.1.1 Objetivos Generales.....	25
1.1.2 Objetivos Específicos	25
1.2 Justificación	26
2.0 Consolidación de Base de Datos y Análisis de Sistemas Críticos	26
2.1 Análisis de Regresión Año/Mes.....	31
2.1.1 TTR vs Costos	34
2.1.2 Mantenimiento menor.....	34
2.1.3 Mantenimiento Intermedio	34
2.1.4 Mantenimiento Mayor.....	34
2.2 Grupo 200 (Planta Propulsora).....	34
2.2.1 Análisis de Regresión (Grupo 200).....	40
2.2.2 TTR vs Costos	41
2.2.3 Mantenimiento menor.....	41
2.2.4 Mantenimiento Intermedio.....	41
2.2.5 Mantenimiento Mayor.....	41
2.3 Comparación de criticidad entre el Grupo Constructivo 200 y el Grupo Constructivo 400 ...	42
2.3.1 Costos acumulados.....	43
2.3.2 Disponibilidad operativa	43
3.0. Aplicación de Metodología Mixta.....	44

3.1	Marco conceptual de Metodología Mixta AQQC.....	44
3.2	Diagrama funcional – Plan de Actividad Grupal.....	46
3.3	Árbol de fallas	50
3.4	Sistema de Enfriamiento de un Motor Propulsor MTU 1163 de una Fragata	50
3.4.1	Sistema de enfriamiento cerrado (Agua dulce o tratada).....	54
3.4.2	Sistema de enfriamiento abierto (Agua de mar)	55
3.4.3	Corrosión en los Sistemas de Enfriamiento del Motor MTU 16V 1163 M94.....	55
3.4.4	Corrosión en el Sistema Cerrado de Enfriamiento.....	55
3.4.5	Corrosión en el Sistema Abierto de Enfriamiento	56
3.5	Sistema de Enfriamiento del Aceite de Lubricación del Motor MTU 1163.....	58
3.5.1	Descripción del sistema	58
3.5.2	Fugas en conexiones y uniones	60
3.5.3	Fugas por fallas en retenes y sellos	61
3.5.4	Fugas por deterioro de tuberías y mangueras	61
3.5.5	Valores Operativos del sistema de lubricación del motor	62
3.6	Sistema de Combustible	62
3.6.1	Componentes principales del sistema de combustible	63
3.6.2	Tanques de almacenamiento	63
3.6.3	Bombas de transferencia	64
3.6.4	Filtros separadores de agua y sedimentos	64
3.6.5	Tanque de día (day tank)	64
3.6.6	Bomba de alimentación (low pressure fuel pump).....	64
3.6.7	Filtros finos de combustible	64
3.6.8	Bomba de inyección (high pressure fuel pump).....	64

3.6.9 Inyectores	65
3.6.10 Retorno de combustible	65
3.6.11 Causas del Taponamiento de Filtros e Inyectores en el Sistema de Combustible	65
3.6.12 Valores Operativos del sistema de combustible del motor	68
3.7 Análisis de Hipótesis	71
3.7.1 Metodología	73
3.7.2 Justificación de la Ponderación	74
3.7.3 Resultados Relevantes	74
3.7.4 Conclusiones	75
4.0 Simulación de la Implementación	76
4.1 Proceso de extracción/codificación	76
4.2 Proceso de simulación mediante TransData/DeepNetwork (Entrenamiento, validación, aprendizaje, simulación)	78
4.3 Proceso de codificación, simulación final de escenarios para el grupo constructivo 200	82
5.0 Análisis De Resultados - Análisis Inferencial De Datos (Julius).....	87
5.1 Introducción	87
5.2 Exploración inicial de los datos	88
5.3 Análisis de varianza (ANOVA).....	89
5.4 Modelo de regresión lineal (OLS).....	90
5.5 Análisis de costos ejecutados	91
5.6 Interpretación técnica	92
5.7 Conclusiones del Análisis Inferencial	93
6. Conclusiones Finales	94
Referencias.....	97

Apéndices101

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Costos Globales de Mantenimiento en Fragatas	19
Tabla 2 TTR del Mantenimiento en fragatas	20
Tabla 3 Costos Globales, % de Costos y % Acumulado de costos	21
Tabla 4 TTR, % de TTR, % Acumulado de Mantenimiento	22
Tabla 5 Coeficiente de Correlación General (Año-Mes). Análisis del TTR, Mnto menor, Mnto Intermedio, Costo y Mnto Mayor	27
Tabla 6 Análisis de Regresión Año - Mes.....	31
Tabla 7 Análisis de Correlación entre el TTR, Costos, Mnto Mayor, Menor e Intermedio. (Grupo 200)	35
Tabla 8 Análisis de Regresión (Grupo 200).....	42
Tabla 9 Análisis final de la encuesta	50
Tabla 10 Valores operativos del sistema de lubricación - Motor MTU 1163	62
Tabla 11 Valores operativos del sistema de Combustible	68
Tabla 12 Análisis de causa raíz-Motor MTU 1163.....	70
Tabla 13 FMECA motor propulsor MTU 1163	72
Tabla 14 Criterios para la Elaboración de Análisis de criticidad	73
Tabla 15 Resultados de Simulación, predicción. Matriz de confusión del escenario	85
Tabla 16 Simulación, predicción del escenario. Resultados del modelo.....	86
Tabla 17 Costos normalizados predichos del escenario.....	86
Tabla 18 Resultados de la predicción de costos del escenario desnormalizados.....	87
Tabla 19 OLS de TTR, Clase de Mnto, GC, Costo planeado	90
Tabla 20 OLS de los Costos ejecutados, Tipo de requerimiento, GC, Costos planeados.....	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Fragata ARC Caldas	18
Figura 2 Costos de mantenimiento y TTR	20
Figura 3 Pareto en Fragatas de Colombia - Costos Globales.....	22
Figura 4 Pareto TTR en fragatas de Colombia	23
Figura 5 Grafica de Costos y Mnto Menor.....	26
Figura 6 Grafica de TTR y Costos.....	28
Figura 7 Grafica de Mnto Menor y Costos.....	28
Figura 8 Grafica de TTR y Mnto Menor.....	29
Figura 9 Grafica de Mnto Intermedio vs Costos	30
Figura 10 Grafica de Mnto Mayor y Mnto Intermedio.....	31
Figura 11 Análisis de Regresión Múltiple de Variables Independientes y Variable Dependiente	33
Figura 12 Grafica del TTR y Costos	35
Figura 13 Grafica de Mnto Mayor y Costos	36
Figura 14 Grafica de TTR y Mnto Intermedio	37
Figura 15 Grafica de TTR y Mnto Mayor	38
Figura 16 Grafica de Costos y Mnto Intermedio	38
Figura 17 Grafica de Mnto mayor e intermedio	39
Figura 18 Diagrama de flujo metodología mixta AQQC.....	46
Figura 19 Arreglo básico de unidad Propulsora.....	47
Figura 20 Diagrama de bloques Sistema de propulsión y auxiliares para una fragata tipo FS 1500.....	48

Figura 21 % de participantes en encuesta por cargos.....	49
Figura 22 % de participación en encuesta por departamentos.....	49
Figura 23 Motor MTU 1163.....	51
Figura 24 Proceso de enfriamiento y lubricación Motor Propulsor.....	54
Figura 25 Sistema de Combustible Motor MTU 1163.....	63
Figura 26 Árbol de fallas en el sistema de propulsión-Aspectos Eléctricos.....	69
Figura 27 Árbol de fallas Sistema de propulsión - Aspectos mecánicos.....	69
Figura 28 Proceso de extracción de columnas - codificación. Parte B.....	77
Figura 29 Proceso de extracción de columnas- codificación Parte C.....	77
Figura 30 Proceso de extracción de columnas- codificación Parte D.....	78
Figura 31 Proceso de simulación inicial Parte A. Archivo maestro para la prueba.....	79
Figura 32 Proceso de simulación inicial Parte B. Tipo de datos y archivo codificado.....	79
Figura 33 Proceso de simulación inicial Parte C, Resultados.....	80
Figura 34 Proceso de Validación-Predicción (30 y 70%), Parte A, Matriz de confusión.....	81
Figura 35 Proceso de Validación-Predicción (30 y 70%), Parte B.....	81
Figura 36 Proceso de Validación-Predicción (30 y 70%), Parte C.....	82
Figura 37 Codificación de escenarios. Archivo .txt de las rutas de acceso para codificación, tipo de datos y valores asumidos de Costos y TTR para el escenario.....	83
Figura 38 Codificación de escenarios. Datos codificados y Etiquetas.....	84
Figura 39 Simulación, predicción de escenario. Archivo txt contiene carpetas archivos de donde se extrae información para la predicción.....	84
Figura 40 BoxPlot,TTR por clase de Mantenimiento.....	88
Figura 41 BoxPlot del TTR por tipo de Requerimiento.....	89
Figura 42 BoxPlot de Costos ejecutados por tipo de Requerimiento.....	92

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Situación actual del mantenimiento aplicado a la fragata ARC Caldas.....	102
Apéndice B. Análisis de datos, correlación y regresión de sistemas críticos por grupo constructivo en la fragata ARC Caldas.....	106
Apéndice C. Desarrollo de la metodología de análisis mixto en la fragata ARC caldas	141
Apéndice D. Registro fotográfico durante el desarrollo de la metodología de análisis mixto ...	154
Apéndice E. Encuesta de frecuencia de ocurrencia de fallas en motor propulsor MTU 1163 ..	157
Apéndice F. Aplicación utilizada en el análisis de datos- simulación “TransData”	159
Apéndice G. Cronograma de actividades para la ejecución de la metodología mixta y presupuesto	160

Glosario

Análisis de correlación: técnica estadística utilizada para determinar el grado de relación existente entre dos o más variables.

Análisis de regresión: método estadístico empleado para estudiar el comportamiento de una variable dependiente respecto a una o varias variables independientes.

Asociación lineal: relación existente entre variables cuando sus cambios siguen una tendencia proporcional positiva o negativa.

Base de datos: conjunto organizado de información que permite almacenar, consultar y analizar datos de manera estructurada.

Buque naval: embarcación diseñada para operaciones militares, logísticas o de defensa marítima.

Calado: distancia vertical entre la línea de flotación y la parte más baja del casco de una embarcación.

Coefficiente de correlación: indicador estadístico que mide la intensidad y dirección de la relación entre variables.

Coefficiente de determinación: valor estadístico que representa el porcentaje de variación explicado por un modelo de regresión.

Componente crítico: elemento de un sistema cuya falla puede afectar significativamente la operación de un equipo o embarcación.

Confiabilidad: capacidad de un sistema o equipo para operar correctamente durante un periodo determinado sin presentar fallas.

Costo de mantenimiento: valor económico asociado a las actividades necesarias para conservar un equipo en condiciones operativas.

Curva de probabilidad de fallas: representación gráfica utilizada para analizar el comportamiento y ocurrencia de fallas en equipos o sistemas.

Datos históricos: información recopilada de eventos o actividades ocurridas en periodos anteriores para fines de análisis.

Disponibilidad: capacidad de un sistema o equipo para encontrarse operativo cuando sea requerido.

Dique: estructura utilizada para realizar inspecciones, reparaciones o mantenimientos en embarcaciones fuera del agua.

Estrategia de mantenimiento: conjunto de acciones planificadas para optimizar la operación, confiabilidad y vida útil de los equipos.

Falla oculta: defecto que no es visible durante la operación normal, pero que puede afectar el desempeño del sistema.

Fragata: buque militar de guerra diseñado para misiones de defensa, vigilancia y operaciones navales.

Frecuencia de mantenimiento: intervalo de tiempo establecido para ejecutar actividades de mantenimiento.

Gestión de mantenimiento: proceso administrativo y técnico orientado a planificar, controlar y optimizar actividades de mantenimiento.

Gráfica de Pareto: herramienta estadística utilizada para identificar las causas más representativas de un problema.

Hipótesis nula: planteamiento estadístico que establece que no existe relación significativa entre variables analizadas.

Indicador de desempeño: parámetro utilizado para medir eficiencia, rendimiento o comportamiento de un proceso.

Ingeniería de mantenimiento: disciplina enfocada en asegurar la confiabilidad y disponibilidad de equipos mediante técnicas de mantenimiento.

Mantenimiento correctivo: intervención realizada después de presentarse una falla para restablecer el funcionamiento del equipo.

Mantenimiento intermedio: conjunto de actividades de mantenimiento con nivel moderado de complejidad técnica y operativa.

Mantenimiento mayor: actividad de mantenimiento de alta complejidad que requiere mayor tiempo, recursos y personal especializado.

Mantenimiento menor: actividades básicas de inspección, ajuste o reparación realizadas en periodos cortos.

Mantenimiento preventivo: acciones programadas destinadas a prevenir fallas y conservar el funcionamiento adecuado de un sistema.

Metodología mixta: enfoque que integra métodos cuantitativos y cualitativos para el análisis de información.

Modelo de regresión múltiple: modelo estadístico que analiza el efecto simultáneo de varias variables independientes sobre una variable dependiente.

Operatividad: capacidad de una unidad o sistema para cumplir sus funciones asignadas de manera eficiente.

Optimización: proceso orientado a mejorar el desempeño de un sistema reduciendo costos, tiempos o recursos.

Parada inesperada: interrupción no programada del funcionamiento de un equipo o sistema.

Periodo evaluado: intervalo de tiempo seleccionado para realizar análisis de datos o mediciones.

Planta propulsora: conjunto de equipos encargados de generar la fuerza necesaria para el desplazamiento de una embarcación.

Prueba de significancia: procedimiento estadístico utilizado para determinar si los resultados obtenidos son relevantes.

Recursos operativos: elementos humanos, técnicos y materiales requeridos para ejecutar actividades de operación y mantenimiento.

Repuestos: piezas destinadas a reemplazar componentes deteriorados o averiados en un sistema.

Sistema crítico: conjunto de equipos o componentes esenciales para el funcionamiento seguro y continuo de una unidad.

Tiempo medio de reparación (TTR): promedio de tiempo requerido para restaurar el funcionamiento de un sistema después de una falla.

Ventana operativa: periodo disponible para ejecutar actividades de mantenimiento sin afectar la misión o disponibilidad de la unidad.

Resumen

Título: “Propuesta de Metodología Mixta de Análisis Para Optimizar Estrategia de Mantenimiento que Impacte en los Costos y TTR de la Fragata Colombiana ARC Caldas”

Autor: Steven Martínez Olmos

Palabras Clave: mantenimiento, fragata, costos, confiabilidad, disponibilidad, optimización, correlación, regresión, estadística, reparación, operatividad, análisis, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, mantenimiento mayor, mantenimiento menor, mantenimiento intermedio, TTR, propulsión, embarcación, sistemas críticos, fallas, repuestos, gestión, desempeño, operatividad, diagnóstico, mantenimiento naval, datos, eficiencia, simulación, predicción.

El presente trabajo de grado propone una metodología mixta de análisis orientada a optimizar la estrategia de mantenimiento de la fragata colombiana ARC CALDAS, con el propósito de disminuir los costos de mantenimiento y el Tiempo Medio de Reparación (TTR), factores que afectan directamente la disponibilidad y confiabilidad operacional de la unidad naval. Para el desarrollo de la investigación se consolidó y analizó información histórica correspondiente a un periodo de 48 meses, relacionada con costos, mantenimientos menores, intermedios y mayores, además del comportamiento del TTR.

A través de herramientas estadísticas como diagramas de Pareto, análisis de correlación y regresión múltiple, se evaluaron las relaciones existentes entre las variables de mantenimiento y operación. Los resultados evidenciaron que la fragata ARC CALDAS presenta los mayores valores de TTR entre las fragatas analizadas, además de una participación significativa en los costos globales de mantenimiento. También se identificaron asociaciones positivas entre determinadas actividades de mantenimiento y el incremento de costos y tiempos de reparación.

El estudio permitió analizar posibles causas relacionadas con el aumento del TTR y de los costos, entre ellas la gestión de materiales, la disponibilidad de repuestos, la ejecución de las actividades de mantenimiento, las condiciones operativas y la experiencia del personal técnico. Adicionalmente, se incorporó la simulación de escenarios mediante redes neuronales, permitiendo evaluar tendencias y posibles comportamientos futuros de las variables analizadas como apoyo a la toma de decisiones.

Trabajo de Grado Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Gerencia de Mantenimiento. Director: David Alberto Fuentes Diaz. PhD.

Abstract

Title: “Proposal of a Mixed Analysis Methodology to Optimize the Maintenance Strategy Impacting Costs and TTR of the Colombian Frigate ARC CALDAS”

Author: Steven Martínez Olmos

Keywords: maintenance, frigate, costs, reliability, availability, optimization, correlation, regression, statistics, repair, operability, analysis, preventive maintenance, corrective maintenance, major maintenance, minor maintenance, intermediate maintenance, TTR, propulsion, vessel, critical systems, failures, spare parts, management, performance, diagnosis, naval maintenance, data, efficiency, simulation, prediction.

This graduate project proposes a mixed analysis methodology aimed at optimizing the maintenance strategy of the Colombian frigate ARC CALDAS in order to reduce maintenance costs and Mean Time to Repair (TTR), factors that directly affect the operational availability and reliability of the naval unit. The research involved the consolidation and analysis of historical information corresponding to a 48-month period related to costs, minor, intermediate, and major maintenance activities, as well as TTR behavior.

Through statistical tools such as Pareto diagrams, correlation analysis, and multiple regression analysis, the relationships between maintenance and operational variables were evaluated. The results showed that the ARC CALDAS frigate presents the highest TTR values among the analyzed frigates, in addition to a significant participation in overall maintenance costs. Positive associations were also identified between specific maintenance activities and increases in costs and repair times.

The study made it possible to analyze possible causes related to increases in TTR and costs, including material management, spare parts availability, maintenance execution, operational conditions, and the experience of technical personnel. Additionally, scenario simulation through neural networks was incorporated, allowing the evaluation of trends and possible future behavior of the analyzed variables as support for decision-making processes.

Degree work

Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Master's Degree in Maintenance Management. Director: David Alberto Fuentes Díaz, PhD.

Introducción

Las empresas de elite, que pretendan ser competitivas a nivel mundial, deben realizar una gestión adecuada del mantenimiento, optimizando recursos, costos, frecuencias de mantenimiento, TTR, entre otros.

La gestión del mantenimiento no solo ayuda a reducir costos y optimizar recursos, sino que también mejora la productividad y la seguridad en el entorno laboral, entregando productos de muy alta calidad, satisfaciendo las necesidades del cliente.

En este caso implementar acciones correctas de mantenimiento en las fragatas (buques de guerra), además de lo manifestado en la parte superior, también ayudaría a garantizar la seguridad y soberanía nacional para nuestro país Colombia, ya que estas unidades Tipo FS. 1500, construidas en el astillero Howaldtswerke-Deutsche Wert en Kiel Alemania, (ARC PADILLA, ARC ANTIOQUIA, ARC CALDAS, ARC INDEPENDIENTE), realizan patrullajes en los límites marítimos de Colombia brindando seguridad, sirven de escoltas en operaciones especiales y ayudan a su vez en la protección del ambiente marino y riqueza natural.

Este documento propone una alternativa para la optimización del mantenimiento que repercute en una disminución de los costos, TTR, repuestos, HH, en el marco de la industria marina, teniendo en cuenta las restricciones propias del cuerpo militar.

1.0 Planteamiento del problema

La Armada Nacional de Colombia cuenta con una gran variedad de embarcaciones navales con diferentes propósitos, por ejemplo:

- Botes de Combate fluvial de bajo calado BCFBC (patrullaje de ríos y áreas de difícil acceso), esta unidad posee un casco en aluminio, capacidad para transportar 5 pasajeros con sus respectivas dotaciones y con 03 ametralladoras (una en proa y 02 en popa), con un calado de diseño 0,45 m, alcanza una velocidad máxima de 24 nudos.
- Buque de desembarco anfibio BDA (Apoyo de transporte de tropas, carga y abastecimiento durante operaciones militares, además para atender emergencias humanitarias en zonas ribereñas y costeras), esta unidad posee un casco en acero naval, capacidad para transportar 3 oficiales, 12 suboficiales y 36 tripulantes, puede transportar 210 toneladas a 9 nudos.
- Fragata tipo *F 1500* (Patrullaje, apoyo operaciones militares), esta unidad posee un casco en acero naval, su tripulación es de 95 personas, su velocidad es de 27 nudos. A este tipo de embarcación es el objetivo de análisis del presente trabajo.

Como se observa en la **Figura 1**. Se presenta la representación visual de la unidad naval descrita.

Figura 1

Fragata ARC Caldas



Nota. Tomado de “Fragata ARC Caldas”, por Wikimedia Commons, 2026, Wikimedia Commons (<https://upload.wikimedia.org/>).

Las embarcaciones antes mencionadas requieren estar disponibles para cualquier operación a las que sean asignadas, por lo anterior se necesita de una correcta gestión de mantenimiento y de recursos, ya sean, costos operativos, costos por mantenimiento, horas hombre, disponibilidad, repuestos, TTR.

En la **Tabla 1**. Se evidencian los costos históricos de mantenimiento más representativos de las unidades tipo fragata que posee la Armada de Colombia (ARC PADILLA, ARC INDEPENDIENTE, ARC CALDAS Y ARC ANTIOQUIA), que presentan los valores más altos de toda la flota de embarcaciones.

Tabla 1

Costos Globales de Mantenimiento en Fragatas

FRAGATA	COSTOS GLOBALES MM
ARC PADILLA	\$ 26.8
ARC INDEPENDIENTE	\$ 24.1
ARC CALDAS	\$ 23.8
ARC ANTIOQUIA	\$ 6.6
Total	\$ 81.4

En la **Tabla 2**. Luego de analizar los tiempos medios de reparación de todas las unidades se observa que la unidad ARC CALDAS, posee un valor muy elevado de TTR, más del 40% respecto a las demás fragatas, porcentaje que aumenta respecto a los otros tipos de embarcaciones; este tiempo medio de reparación también representa un alto costo operativo debido a que las fragatas quedan No disponibles.

Tabla 2

TTR del Mantenimiento en fragatas

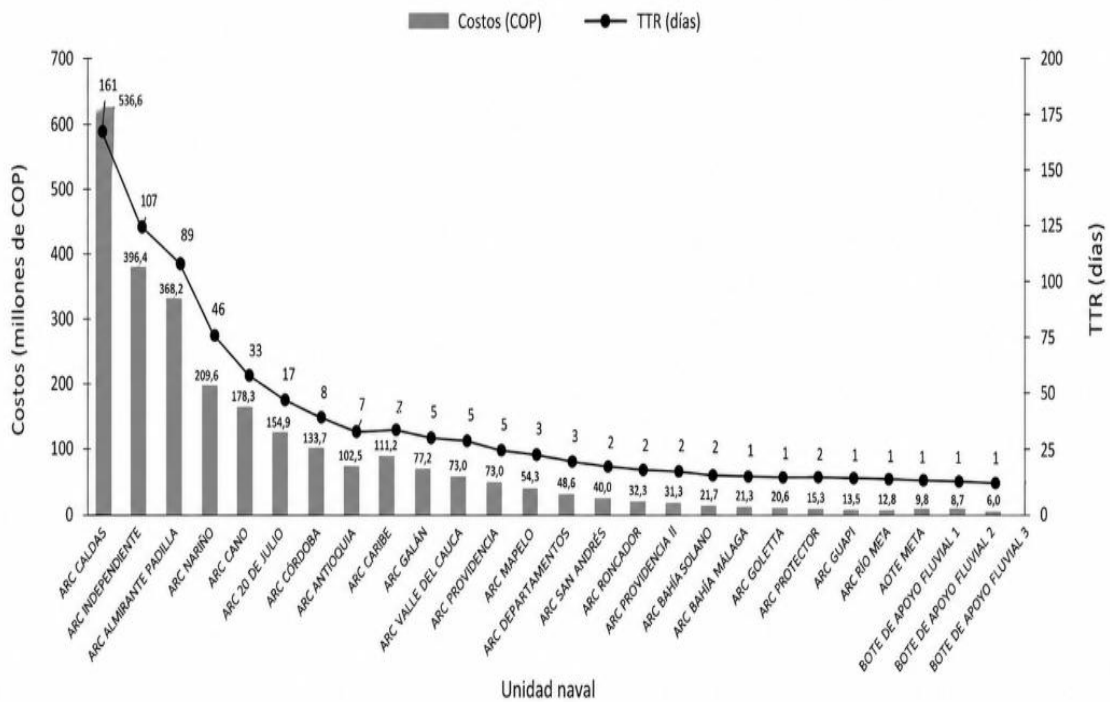
FRAGATA	TTR (DÍAS) M
ARC CALDAS	168.9
ARC PADILLA	67.6
ARC ANTIOQUIA	60.9
ARC INDEPENDIENTE	53.3
Total	350.9

En la **Figura 2**. Se muestran los costos de mantenimiento de las diferentes embarcaciones (eje izquierdo) y TTR (eje derecho). Como se observa los costos y TTR asociados a las fragatas en su conjunto representan un factor importante dentro de los costos globales y TTR del mantenimiento de las embarcaciones.

Teniendo en cuenta la información antes tabulada **Tabla 3**. y **Tabla 4**. Se realizó gráfica de Pareto para las cuatro fragatas de Colombia, referente a los costos globales de mantenimiento y el TTR (**Figuras 3. y 4.**), como sigue:

Figura 2

Costos de mantenimiento y TTR



Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

Tabla 3

Costos Globales, % de Costos y % Acumulado de costos

FRAGATA	COSTOS		COSTO ACUMULADO
	GLOBALES	%COSTOS	
	MM		
ARC PADILLA	\$ 26.8	32,92%	32,92%
ARC INDEPENDIENTE	\$ 24.1	29,68%	62,60%
ARC CALDAS	\$ 23.8	29,29%	91,89%
ARC ANTIOQUIA	\$ 6.6	8,11%	100,00%
Total	\$ 81.4	100,0%	

Figura 3

Pareto en Fragatas de Colombia - Costos Globales

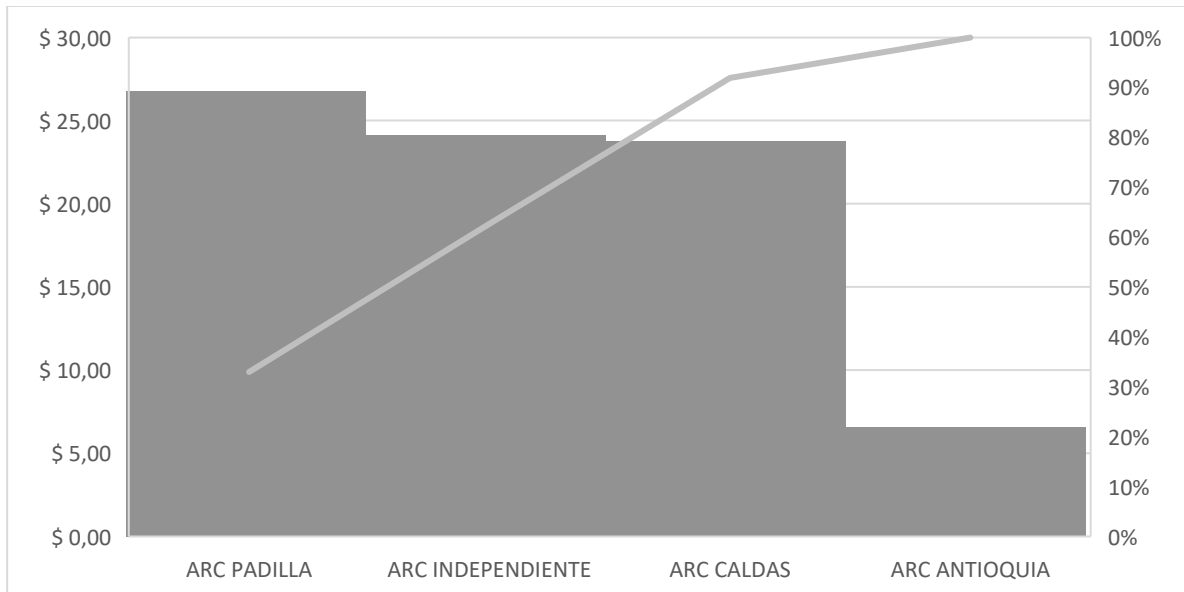


Tabla 4

TTR, % de TTR, % Acumulado de Mantenimiento

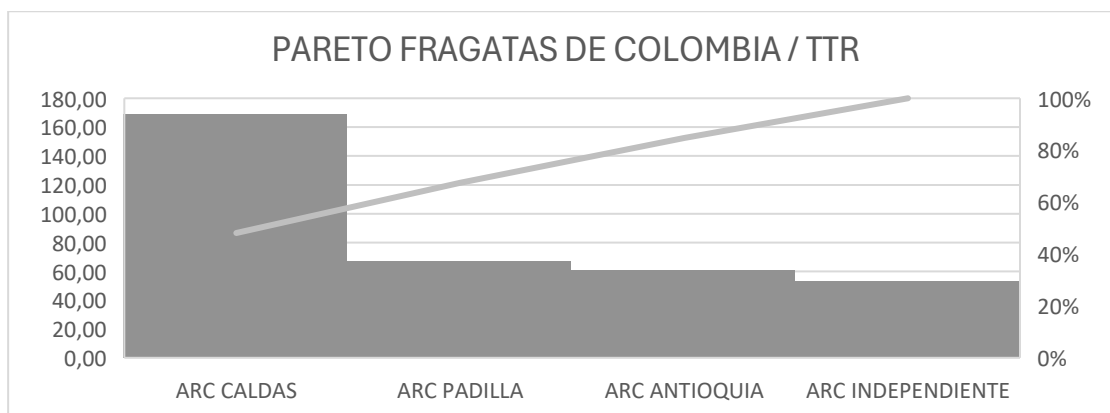
FRAGATA	TTR(DÍAS) MM	%TTR	TTR ACUMULA
ARC CALDAS	168.9	48,15%	48,15%
ARC PADILLA	67.6	19,29%	67,43%
ARC ANTIOQUIA	60.9	17,35%	84,79%
ARC INDEPENDIENTE	53.3	15,21%	100,00%
Total	350.9	100,00%	

Al analizar la **Figura 4**. Pareto del TTR de las fragatas de la Armada Nacional de Colombia, se evidencia que el mayor TTR, tiempo medio de reparación lo tiene la fragata ARC CALDAS.

Adicionalmente, teniendo en cuenta los datos históricos antes mostrados en la **Figura 2**. los costos de mantenimiento de las fragatas representan el 15% del total y los TTR de las fragatas representan el 18% del total, donde la fragata ARC CALDAS tiene una participación importante en ambos aspectos.

Figura 4

Pareto TTR en fragatas de Colombia



El problema en esta oportunidad es el **Alto costo de mantenimiento y un valor elevado de TTR (Tiempo medio de reparación)**, en la Fragata ARC CALDAS, lo que afecta directamente la disponibilidad de la unidad.

Al reflexionar sobre cuáles serían las posibles causas de que los Costos y TTR sean elevados pude recopilar las siguientes preguntas:

- ¿Las frecuencias de mantenimiento son las correctas?
- ¿Los repuestos son de mala calidad?
- ¿La gestión de los materiales se realiza en el tiempo adecuado?

- ¿El mantenimiento está siendo mal ejecutado?
- ¿Los equipos y/o repuestos son obsoletos?
- ¿El personal que realiza los mantenimientos tienen las competencias y experiencia?
- ¿Se cuenta con la ventana operativa adecuada para realizar los mantenimientos?
- ¿Se cuenta con el presupuesto para realizar los mantenimientos?
- ¿Se presentan muchos reprocesos durante las actividades de mantenimiento?
- ¿Los repuestos se pueden conseguir a nivel nacional o deben ser importados?
- ¿Se cuentan con los equipos y/o herramientas adecuadas para la ejecución del mantenimiento?
- ¿Las condiciones operativas están fuera de valores normales?
- ¿Es necesario que la unidad esté en dique para realizar el mantenimiento?
- ¿En qué posición se encuentra la unidad en la curva de probabilidad de fallas?

Este trabajo se enfoca en el análisis y desarrollo de una metodología mixta aplicada a la fragata ARC CALDAS, con el fin de optimizar los costos de mantenimientos y del TTR.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Generales

- Optimizar la estrategia de mantenimiento mediante una metodología mixta de análisis que impacte en los costos y TTR en la unidad ARC CALDAS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Consolidar una base de datos en cuanto a costos y TTR de la unidad ARC CALDAS, tendientes a determinar sistemas críticos y los históricos de mantenimiento.

- Formular en 4 fases la metodología mixta de análisis (AQQC) articulando los métodos FMECA, RCA, Causa–Efecto y FTA, que permita identificar fallas causales, evaluando las acciones para la toma de decisiones, en el sistema crítico encontrado en la fragata ARC CALDAS.

- Simular la implementación de la metodología mixta, con el fin de evaluar el impacto en los costos de mantenimiento y en TTR, en la fragata ARC CALDAS.

1.2 Justificación

En la actualidad es de vital importancia realizar una gestión óptima de todo lo referente al mantenimiento, costos de operación, costos de mantenimientos, RH, TTR, con el fin de mantener operativa una unidad y poder ejecutar cualquier misión que le sea asignada.

Entender la importancia de gestionar el mantenimiento con técnicas avanzadas en una embarcación naval es imprescindible, ya que además lograr optimizar costos, ejecutar las tareas en un tiempo correcto, se ayuda además a la detección de fallas, sean ocultas o no, con el fin de atacarlas en el menor tiempo posible, evitando así que algún sistema crítico, alguna parte, componente o equipo crítico cause una parada inesperada.

Adicionalmente, este trabajo contribuye a la seguridad nacional y a la de todos los colombianos, dado que las embarcaciones operan con una mayor confiabilidad y disponibilidad.

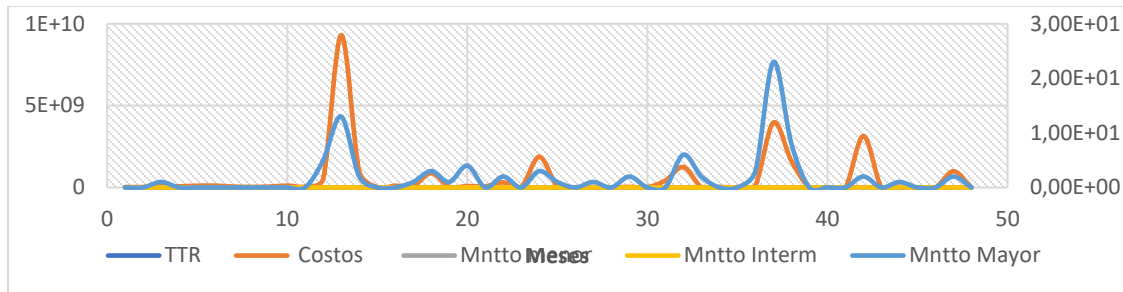
2.0 Consolidación de Base de Datos y Análisis de Sistemas Críticos

En la **Figura 5**. Se muestra en el eje izquierdo los costos y en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observa que donde hay picos de Mnto Mayor también hay Picos de Costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 13, 37 y 42.

A partir de un análisis de correlación entre las variables Costos, TTR, Mnto Menor, Mnto Intermedio, Mnto Mayor, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 5.

Figura 5

Grafica de Costos y Mnto Menor



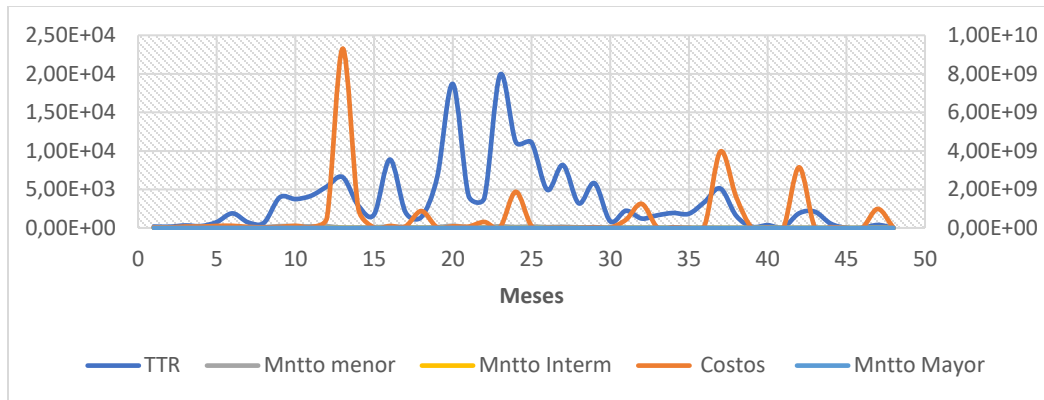
De los resultados obtenidos en la **Tabla 5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.73 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla 5

Coeficiente de Correlación General (Año-Mes). Análisis del TTR, Mnto menor, Mnto Intermedio, Costo y Mnto Mayor

Variable	TTR	Costos /1000	Mantenimiento menor	Mantenimiento intermedio	Mantenimiento mayor
TTR	1,00				
Costos /1000	0,11	1,00			
Mantenimiento menor	0,66	-0,21	1,00		
Mantenimiento intermedio	0,11	0,82	-0,04	1,00	
Mantenimiento mayor	0,16	0,73	0,16	0,55	1,00

En la **Figura 6**. se muestra en el eje Izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos del TTR y de Costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 13, 20,23 y 37.

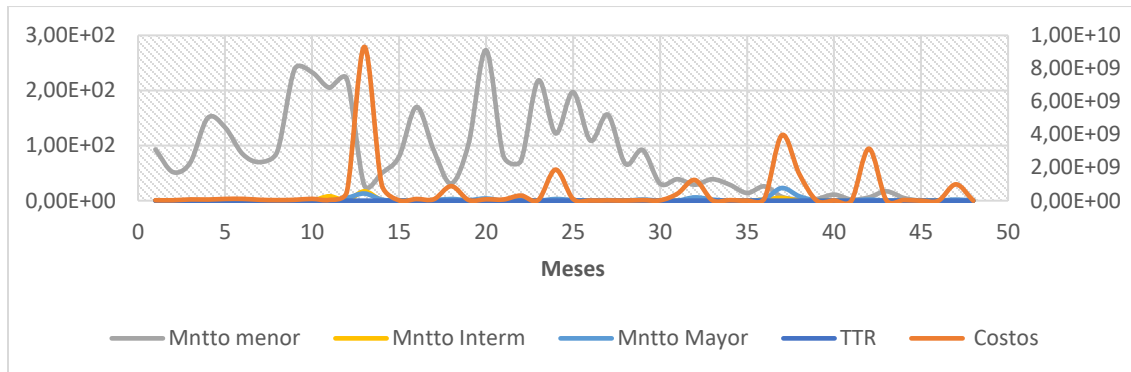
Figura 6*Grafica de TTR y Costos*

De los resultados obtenidos en la **Tabla 5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.11 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva débil. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

En la **Figura 7**. Se muestra en el eje izquierdo el número de actividades de mantenimiento menor y en el eje derecho los costos. Se observa que no existe una posible relación o correspondencia entre el número de actividades de mantenimiento menor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos no se observan picos definidos del Mnto Menor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y costos son los meses 10, 13, 20 y 37.

De los resultados obtenidos en la **Tabla 5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es -0.21 entre las variables Mnto Menor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal negativa débil. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Menor aumenta, los costos tenderán a disminuir.

Figura 7*Grafica de Mnto Menor y Costos*

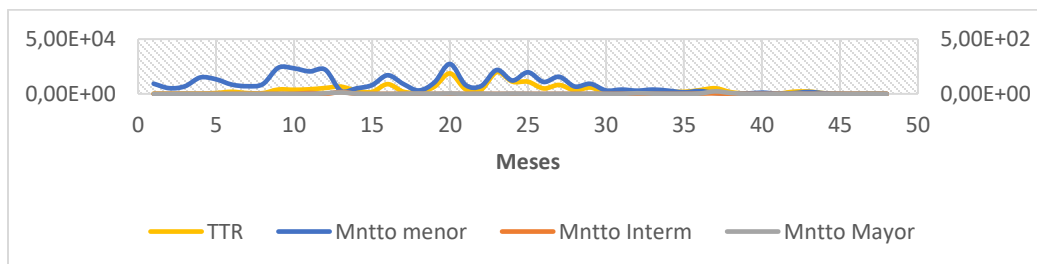


En la **Figura 8**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento menor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y el mantenimiento menor a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mantenimiento Menor y de TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 16, 20 y 23.

A partir de un análisis de correlación entre las variables Costos, TTR, Mnto Menor, Mnto Inter, Mnto Mayor, **Tabla 5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.66 entre las variables Mnto Menor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Menor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura 8

Grafica de TTR y Mnto Menor

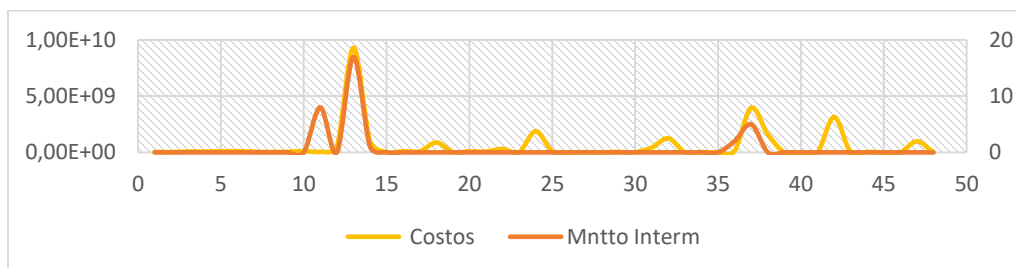


En la **Figura 9**. Se muestra en el eje izquierdo el número de actividades de mantenimiento intermedio y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre las actividades de mantenimiento intermedio y los costos a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque se observan algunos picos definidos de mantenimiento intermedio y de costos en las mismas frecuencias. Los meses con valores más altos de mantenimiento Intermedio y los costos, son los meses 11,13 y 37.

De los resultados obtenidos, **Tabla 5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.82 entre las variables Mnto Intermedio y costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Intermedio aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura 9

Grafica de Mnto Intermedio vs Costos



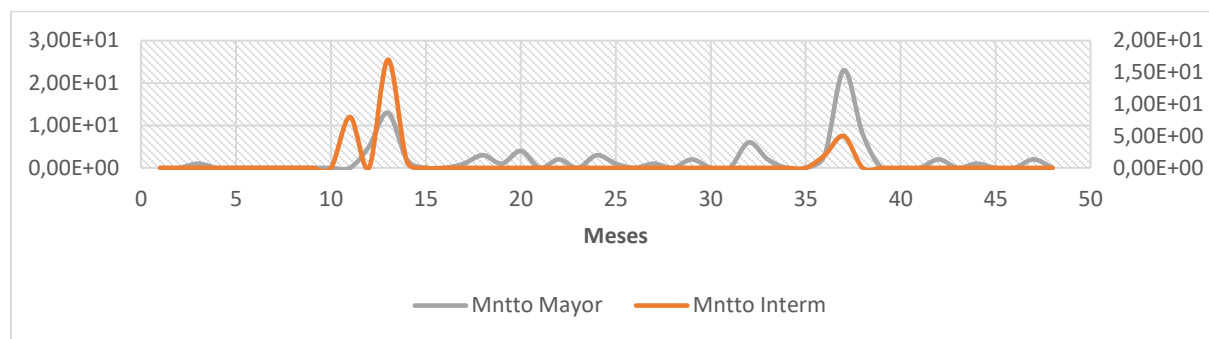
En la **Figura 10**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo número de actividades de mantenimiento intermedio.

Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el número de actividades de mantenimiento Mayor y el mantenimiento Intermedio a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque en algunas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y Mnto Intermedio. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y el mantenimiento Intermedio, son los meses 13, 32 y 37.

De los resultados obtenidos, **Tabla 5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,55 entre las variables Mnto Intermedio y Mnto Mayor, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el número de actividades de Mantenimiento Intermedio aumenta, el número de actividades de mantenimiento Mayor tendera a aumentar.

Figura 10

Grafica de Mnto Mayor y Mnto Intermedio



2.1 Análisis de Regresión Año/Mes

En la **Tabla 6**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

Es importante tener en cuenta que el coeficiente de determinación R^2 muestra un valor de 0,53, lo que significa que el 53% de la variación del TTR es explicado por la variación de las variables independientes (Costos, Mnto Mayor, Mnto menor, Mnto Intermedio).

Tabla 6

Análisis de Regresión Año - Mes

Estadístico	Valor					
Correlación múltiple	0,73					
Coefficiente de determinación (R ²)	0,53					
R ² ajustado	0,49					
Error típico de la estimación	3124,29					
Número de observaciones	48					
Analisis de Varianza - origen de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	Valor F	Valor p	
Regresión	4	476334213	119083553	12,2	0	
Residuos	43	419731820	9761205,11			
Total	47	896066032				
Origen de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	Valor F	Valor p	
Regresión	4	476334212,5	119083553,1	12,2	0	
Residuos	43	419731819,8	9761205,11			
Total	47	896066032,3				
Coeficientes del modelo						
Variable	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Valor p	Intervalo de confianza 95% - Inferior	Intervalo de confianza 95% - Superior
Intercepción	-512,8	739,92	-0,63	0,49	-2004,99	979,39
Costos /1000	0,35	0,05	6,59	0,13	-2004,99	979,39
Mantenimiento menor	42,67	6,28	6,79	0	0	55,35
Mantenimiento intermedio	-328,16	295,16	-1,11	0,27	-923,45	267,13
Mantenimiento mayor	176,59	258,5	0,3	0,3	-163,17	520,54

Por otra parte, se evidencia que el Coeficiente R^2 ajustado muestra un valor de 0,48, lo que significa que el 48% de la variación del TTR es explicado por la variación de las variables independientes (Costos, Mnto Mayor, Mnto menor, Mnto Intermedio), teniendo en cuenta la relación ente el número de muestras (n) y el número de variables independientes.

También teniendo en cuenta la **Tabla 6. y Apéndices B8. y B9.** Páginas 131 y 132. A continuación, se realizará la prueba de significancia general (**F**)

La **Figura 11.** Muestra el modelo de regresión múltiple donde se evalúan si las variables independientes realmente explican cambios en la variable dependiente, además se observa fórmula del *estadístico F* el cual mide qué tan bueno es el modelo comparando lo que el modelo explica contra lo que no puede explicar. Si el valor de **F** es grande, significa que el modelo sí aporta información útil y es probable que al menos una variable esté relacionada con “**y**”.

Figura 11

Análisis de Regresión Múltiple de Variables Independientes y Variable Dependiente

- Hipótesis:
 - $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ (No hay relación lineal)
 - $H_A: \text{Al menos un } \beta_i \neq 0$ (Existe relación lineal entre (y) y al menos un x_i)

$$F = \frac{\frac{SSR}{k}}{\frac{SSE}{n-k-1}} = \frac{MSR}{MSE}$$

Nota. Tomado de Análisis estadístico, Fuentes, Programa de Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander.

Donde (u) = grados de libertad del numerador o número de variables independientes, (v) = grados de libertad del denominador, se calcula según (v) = $n-u-1$, donde n es el número de muestras. Para este caso en particular u es igual a 3 y $v = 48-3-1 = 44$.

Con los datos de u y v anteriores Obtenidos de la **Tabla 6.** y **Apéndice B8. Página 131.** Distribución F de Fisher – Snedecor, el valor de $F_{\text{crítico}}$ para $u = 3$ y $v = 44$, resultando en 2.62. A partir del resultado de $F = 12.2$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de **2.62** se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del **0.95**.

A continuación, se presenta la prueba de significancia individual de todas las variables a través del estadístico t , el número de muestras (48, tiende a infinito) y el número de variables independientes con $\alpha = 0,025$, obteniendo como resultado un $t_{\text{crítico}}$ de 1,96. Los resultados del análisis se muestran a continuación, con los datos del cálculo de t tomados del **Apéndice B9. Página 134.** Estadístico t .

2.1.1 TTR vs Costos

Decisión: $t(\text{tabla}) = 1,38 < 1,96 = t_{\text{crítico}}$, **Ho se acepta.**

Conclusión: **No** Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente a los costos. (La pendiente de los costos en esta oportunidad es cero).

2.1.2 Mantenimiento menor

Decisión: Como $t = 6,79 > 1,96 = t_{\text{crítico}}$, **Ho se rechaza.**

Conclusión: **Hay** suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente al mantenimiento menor. En otras palabras, el mantenimiento menor influye en la variación del TTR. (La pendiente del mantenimiento menor en esta oportunidad es diferente de cero).

2.1.3 Mantenimiento Intermedio

Decisión: Como $t = -1,11 < 1,96 = t_{\text{crítico}}$ 0,025, **Ho se acepta.**

Conclusión: No Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente Mantenimiento intermedio. (La pendiente del mantenimiento intermedio en esta oportunidad es cero).

2.1.4 Mantenimiento Mayor

Decisión: Como $t = 1,054 < 1,96 = t_{\text{crítico}}$ 0,025, **Ho se acepta.**

Conclusión: No Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente al mantenimiento mayor. (La pendiente del mantenimiento mayor en esta oportunidad es cero).

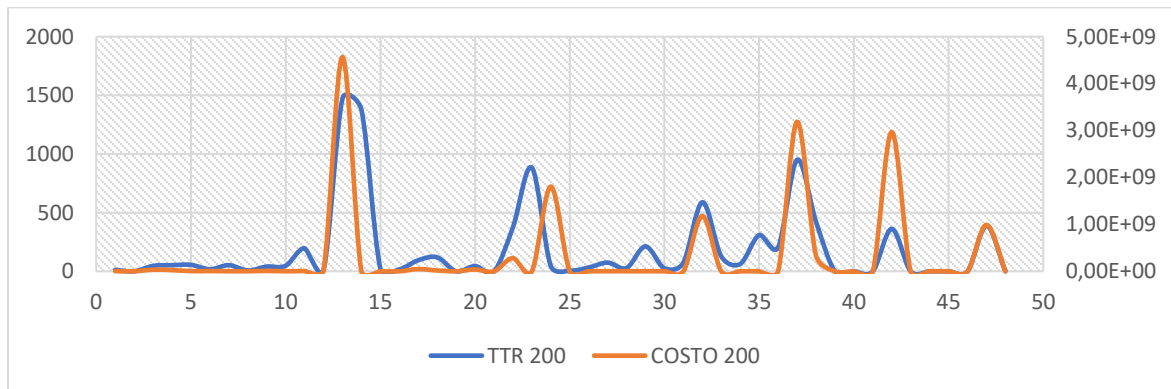
2.2 Grupo 200 (Planta Propulsora)

En la **Figura 12**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo

del periodo evaluado, 48 meses, porque en las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de TTR y costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 13,37 y 42.

Figura 12

Grafica del TTR y Costos



A partir de un análisis de correlación entre las variables Costos, TTR, Mnto Menor, Mnto Inter, Mnto Mayor, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 7.

De los resultados obtenidos, **Tabla 7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.64 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla 7

Análisis de Correlación entre el TTR, Costos, Mnto Mayor, Menor e Intermedio. (Grupo 200)

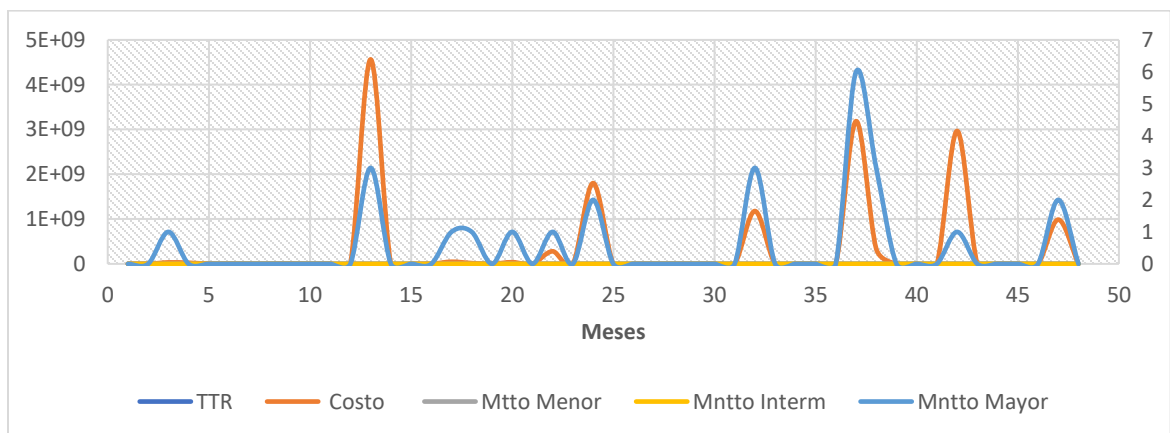
Variable	TTR	Costos	Mantenimiento menor	Mantenimiento intermedio	Mantenimiento mayor
TTR	1,00				
Costos	0,64	1,00			
Mantenimiento menor	-0,14	-0,15	1,00		
Mantenimiento intermedio	0,56	0,67	-0,05	1,00	
Mantenimiento mayor	0,56	0,75	-0,31	0,31	1,00

En la **Figura 13**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo los Costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 13,37 y 42.

De los resultados obtenidos, **Tabla 7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,75 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura 13

Grafica de Mnto Mayor y Costos



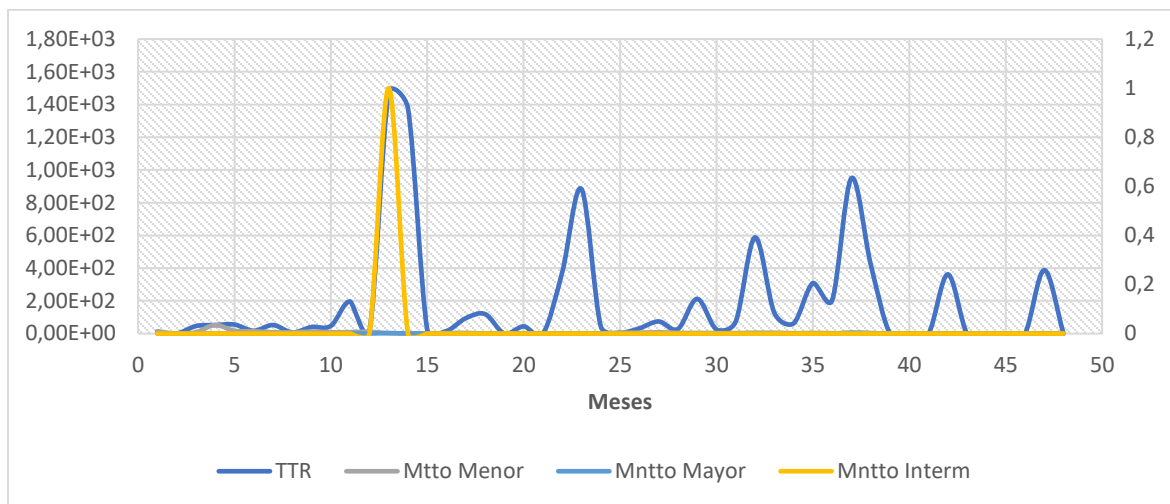
En la **Figura 14**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento intermedio. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Intermedio y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de

Mnto Intermedio y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 13,23 y 37.

De los resultados obtenidos, **Tabla 7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,56 entre las variables Mnto Intermedio y TTR. Lo que indica que puede existir una Asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el mantenimiento intermedio aumenta, El TTR tendera a aumentar.

Figura 14

Grafica de TTR y Mnto Intermedio



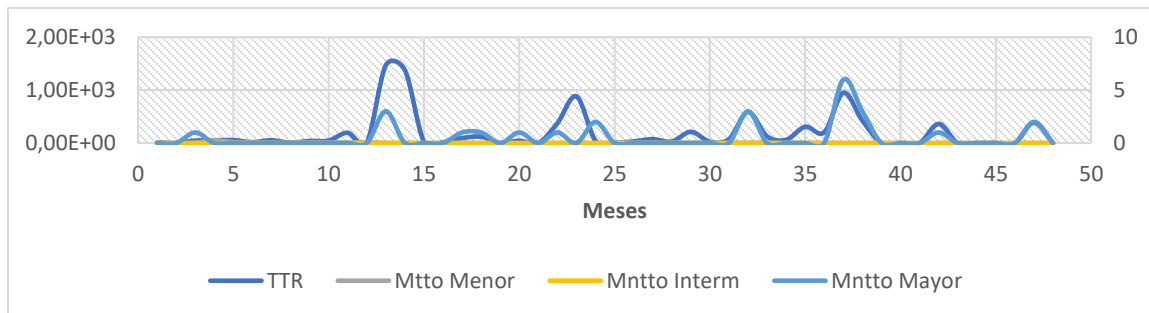
En la **Figura 15**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Mayor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos de Mnto Mayor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y TTR son los meses 13,32 y 37.

De los resultados obtenidos, **Tabla 7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,56 entre las variables Mnto Mayor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal

positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura 15

Grafica de TTR y Mnto Mayor

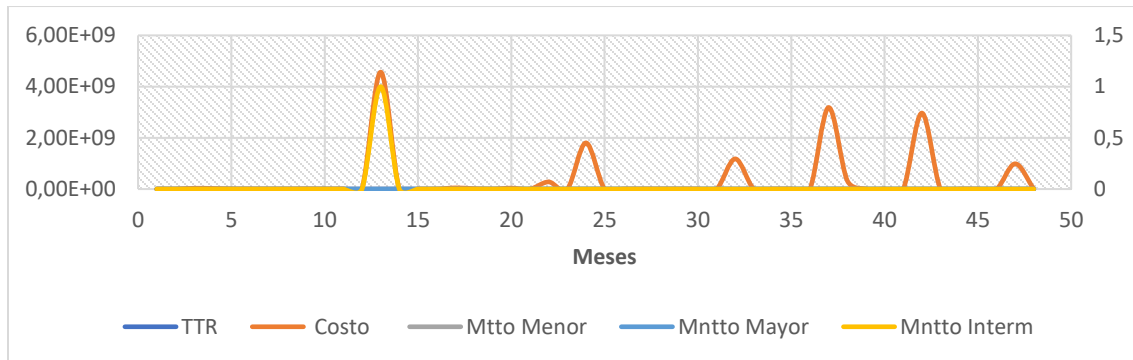


En la **Figura 16**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de mantenimiento intermedio y en el eje izquierdo los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre las actividades de mantenimiento intermedio y los costos a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Intermedio y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento Intermedio y los costos, son los meses 13,37 y 42.

De los resultados obtenidos, **Tabla 7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,67 entre las variables Mnto Intermedio y costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento intermedio aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura 16

Grafica de Costos y Mnto Intermedio

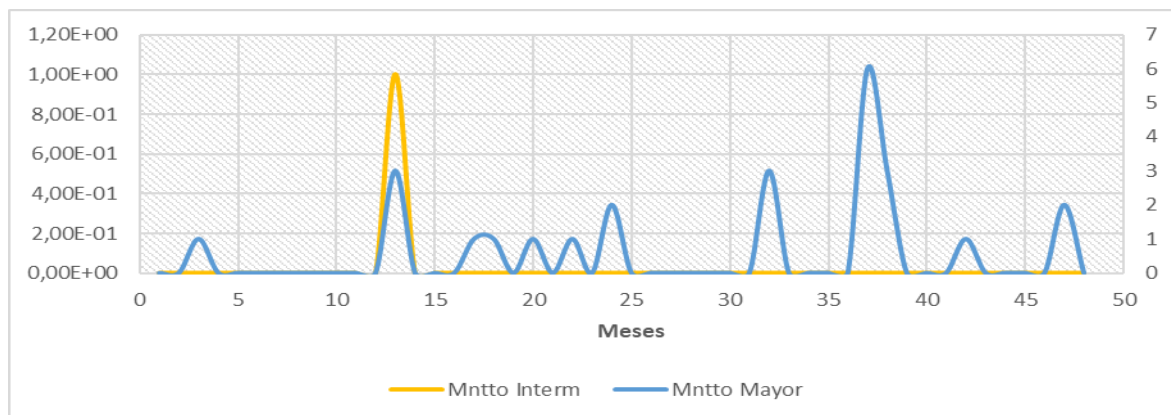


En la **Figura 17**. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el número de actividades de mantenimiento Mayor y el mantenimiento Intermedio a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque en las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Intermedio y Mnto Mayor. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y el mantenimiento Intermedio, son los meses 13 Y 37.

De los resultados obtenidos, **Tabla 7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,31 entre las variables Mnto Intermedio y Mnto Mayor, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva débil. Esto significa que a medida que el mantenimiento intermedio aumenta, el mantenimiento mayor tendera a aumentar.

Figura 17

Grafica de Mnto mayor e intermedio



2.2.1 Análisis de Regresión (Grupo 200)

En la **Tabla 8**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

Es importante tener en cuenta que el coeficiente de determinación R^2 muestra un valor de 0.49, lo que significa que el 49% de la variación del TTR es explicado por la variación de las variables independientes (Costos, Mnto Mayor, Mnto menor, Mnto Intermedio).

Por otra parte, se evidencia que el Coeficiente R^2 Ajustado muestra un valor de 0.44, lo que significa que el 44% de la variación del TTR es explicado por la variación de las variables independientes (Costos, Mnto Mayor, Mnto menor, Mnto Intermedio), teniendo en cuenta la relación ente el número de muestras (n) y el número de variables independientes.

También teniendo en cuenta la **Tabla 8**. y los **Apéndices B8**. y **B9**. Páginas 131 y 132. A continuación, se realizará la prueba de significancia general (**F**)

Donde (u) = grados de libertad del numerador o número de variables independientes, (v) = grados de libertad del denominador, se calcula según (v) = $n - u - 1$, donde n es el número de muestras. Para este caso en particular u es igual a 3 y $v = 48 - 3 - 1 = 44$.

Con los datos de u y v anteriores se obtiene de la **Tabla 8**. Y **Apéndices B8**. y **B9**. Páginas 131 y 132. Distribución F de Fisher – Snedecor, el valor de $F_{\text{crítico}}$ para $u = 3$ y $v = 44$, resultando en 2.62. A partir del resultado de **$F = 10,22$** y comparándolo con el **$F_{\text{crítico}}$ de 2.62** se concluye que se rechaza la hipótesis de **H_0** y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión **explica** parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del **0.95**.

A continuación, se presenta la prueba de significancia individual de todas las variables a través del estadístico **t** , el número de muestras (48, tiende a infinito) y el número de variables

independientes con $\alpha = 0,025$, obteniendo como resultado un $t_{\text{crítico}}$ de 1,96. Los resultados del análisis se muestran a continuación, con los datos del cálculo de t tomados de la **Tabla 8.** y **Apéndice B9.** Página 132. Estadístico t .

2.2.2 TTR vs Costos

Decisión: $t(\text{tabla}) = 0.48 < 1,96 = t_{\text{crítico}}$, **Ho se acepta**

Conclusión: No Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente a los costos. (La pendiente de los costos en esta oportunidad es cero).

2.2.3 Mantenimiento menor

Decisión: Como $t = -0,35 < 1,96 = t_{\text{crítico}}$, **Ho se acepta**

Conclusión: No Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente al mantenimiento menor. (La pendiente del mantenimiento menor en esta oportunidad es cero).

2.2.4 Mantenimiento Intermedio

Decisión: Como $t = 2.33 > 1,96 = t_{\text{crítico}}$ 0,025, **Ho se Rechaza**

Conclusión: Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente Mantenimiento intermedio. (La pendiente del mantenimiento intermedio en esta oportunidad es diferente de cero).

2.2.5 Mantenimiento Mayor

Decisión: Como $t = 1.97 > 1,96 = t_{\text{crítico}}$ 0,025, **Ho Se rechaza**

Conclusión: Hay suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR, en este caso puntual referente al mantenimiento mayor. (La pendiente del mantenimiento mayor en esta oportunidad es diferente de cero).

Tabla 8*Análisis de Regresión (Grupo 200)*

Estadístico	Valor					
Coefficiente de correlación múltiple	0,7					
Coefficiente de determinación (R ²)	0,49					
R ² ajustado	0,44					
Error típico de la estimación	252,72					
Número de observaciones	48					
Origen de variación	Grados de libe	Suma de cua	Promedio de	Valor F	Valor p	
Regresión	4	26174398,2	6529849,54	10,22	0	
Residuos	43	8571189,32	199329,98			
Total	47	34745587,5				
Variable	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Valor p	Intervalo de confianza	Intervalo de confianza 95% -
Intercepción	106,75	46,55	2,28	0,03	12,27	201,23
Mantenimiento menor	-1,62	4,8	-0,34	0,73	-10,85	7,62
Mantenimiento intermedio	874,8	375,2	2,33	0,02	117,68	1631,92
Mantenimiento mayor	103,08	35,23	1,97	0,05	-2,19	208,35

Teniendo en cuenta los anteriores análisis-gráficas y datos presentes en la base de datos recolectada, se evidencian dos grupos constructivos críticos que son:

Grupo Constructivo 200 (Sistema de propulsión), el cual presenta el valor más representativo en cuanto a los costos durante el periodo evaluado.

Grupo Constructivo 400 (Sistema de mando y exploración), el cual presenta el valor más representativo en cuanto a TTR durante el periodo evaluado.

2.3 Comparación de criticidad entre el Grupo Constructivo 200 y el Grupo Constructivo 400

Al analizar los registros históricos de fallas y los indicadores estadísticos en un periodo de cinco años, se identificaron dos grupos constructivos con mayor relevancia: el **Grupo 200 (Sistema de Propulsión)** y el Grupo 400 (Sistema de Mando y Exploración). Aunque ambos muestran comportamientos críticos, el Grupo 200 se establece como el de mayor importancia debido a las siguientes razones:

Impacto directo en la operación de la plataforma: las fallas en el sistema de propulsión (**Grupo 200**) generan la pérdida inmediata de movilidad, lo que imposibilita el cumplimiento de la

misión principal de la unidad. En contraste, las fallas en el sistema de mando y exploración (Grupo 400) afectan la capacidad de detección y control, pero no detienen la navegación. Por tanto, el impacto del Grupo 200 es más severo al comprometer la funcionalidad básica de la embarcación.

2.3.1 Costos acumulados

El análisis económico evidencia que los costos asociados al **Grupo 200** superan significativamente a los del Grupo 400. Esto se debe al alto valor de los repuestos, a la necesidad de mano de obra especializada y al costo logístico de movilizar y reparar componentes de gran tamaño. El Grupo 400, aunque presenta tiempos prolongados de reparación, involucra costos menores en comparación.

2.3.2 Disponibilidad operativa

El tiempo de reparación (TTR) es más alto en el Grupo 400; sin embargo, la consecuencia de una falla en el **Grupo 200 es más crítica** porque deja la unidad fuera de servicio de manera absoluta. Una avería en el sistema de mando puede reducir la eficiencia operativa, pero una falla en propulsión obliga a suspender la misión o depender de asistencia externa.

Severidad de fallas y riesgos asociados: las fallas del **Grupo 200 suelen escalar con rapidez a daños mayores** (ejemplo: pérdida de lubricación que deriva en fallo catastrófico del motor). Este nivel de severidad no es equiparable al del Grupo 400, donde los fallos, aunque significativos, pueden ser gestionados con medidas de contingencia temporales.

3.0. Aplicación de Metodología Mixta

3.1 Marco conceptual de Metodología Mixta AQQC

La metodología AQQC es una metodología mixta de análisis aplicada a la gestión del mantenimiento, desarrollada para optimizar costos de mantenimiento y disminuir el TTR (Tiempo Total de Reparación) mediante la integración de análisis estadístico, criticidad técnica, participación organizacional y evaluación temporal de las intervenciones en sistemas navales complejos.

La metodología fue aplicada sobre la fragata ARC Caldas, enfocándose principalmente en el Grupo Constructivo 200 y sistemas críticos de planta propulsora.

A = ANÁLISIS

Corresponde a la fase de procesamiento y evaluación técnica de la información.

Esta etapa transforma los datos históricos y operacionales en variables de análisis para la toma de decisiones en mantenimiento.

¿Qué contiene la sigla A?

Incluye:

- Equipo interdisciplinario.
- Plan de actividades.
- Diagrama de bloques funcional.
- Elaboración de encuesta técnica.

Q = QUÉ

Corresponde a la identificación de los elementos críticos del mantenimiento.

Esta etapa determina qué sistemas, equipos, variables o componentes requieren intervención prioritaria.

¿Qué contiene la sigla Q (Qué)?

Incluye identificación de:

- Sistemas críticos.
- Variables críticas.
- Modos de falla.
- Equipos críticos.
- Fallas críticas
- Elaboración de árbol de fallas
- Análisis de causa raíz.

Q = QUIÉN

Corresponde a la participación humana y organizacional dentro del mantenimiento.

Esta etapa incorpora la validación grupal y la participación técnica de los actores involucrados en el proceso.

¿Qué contiene la sigla Q (Quién)?

Incluye:

- Participación de personal Técnico especializado por disciplina.
- Análisis de hipótesis.
- Aplicación de Femeca.
- Validación grupal.

C = CUÁNDO

Corresponde a la evaluación temporal y predictiva del mantenimiento.

Esta etapa determina el comportamiento temporal de las intervenciones y la proyección de resultados.

¿Qué contiene la sigla C?

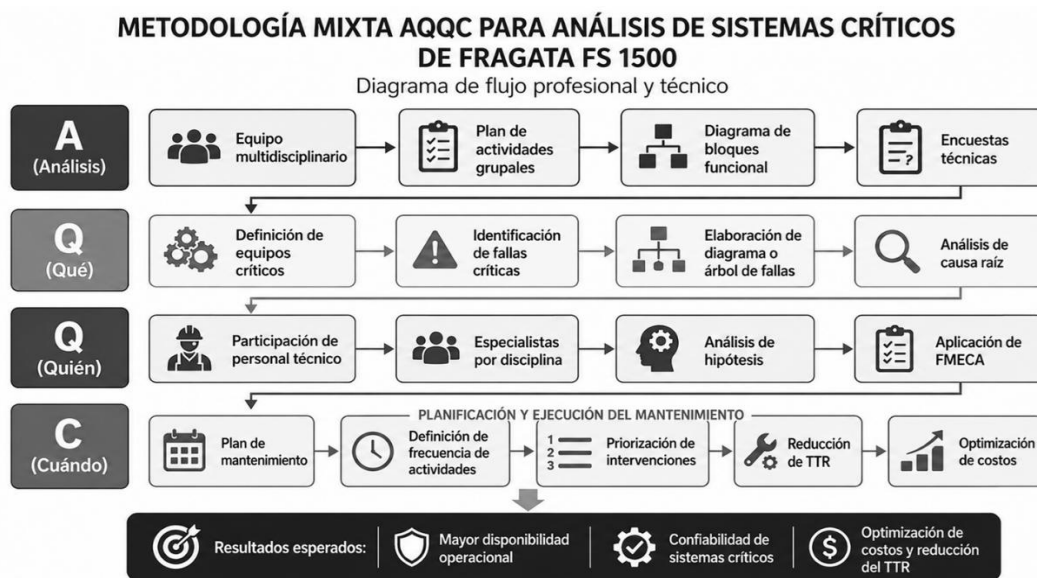
Incluye:

- Actividades de mantenimiento recomendadas
- Frecuencia de mantenimiento.
- Priorización de Intervenciones.

En la **Figura 18**. Se muestra diagrama de flujo de la metodología mixta AQQC para el sistema crítico de la fragata ARC Caldas.

Figura 18

Diagrama de flujo metodología mixta AQQC



3.2 Diagrama funcional – Plan de Actividad Grupal

Para la aplicación de la metodología mixta se crea un grupo multidisciplinario conformado por:

*Líder (Trabajador perteneciente al departamento en el cual falla el equipo), en este caso es el Ing. Steven Martínez Olmos asignado al departamento de Mecánica, con más de 14 años

de experiencia específica en la parte naval, programación, seguimiento, control y ejecución de actividades de mantenimiento, reparación y construcción de embarcaciones navales.

*Supervisor de mecánica, en este caso es el señor Rafael Bertel, tecnólogo electromecánico-Motorista de profesión y con más de 20 años en la ejecución de mantenimiento, reparaciones y construcción de embarcaciones navales

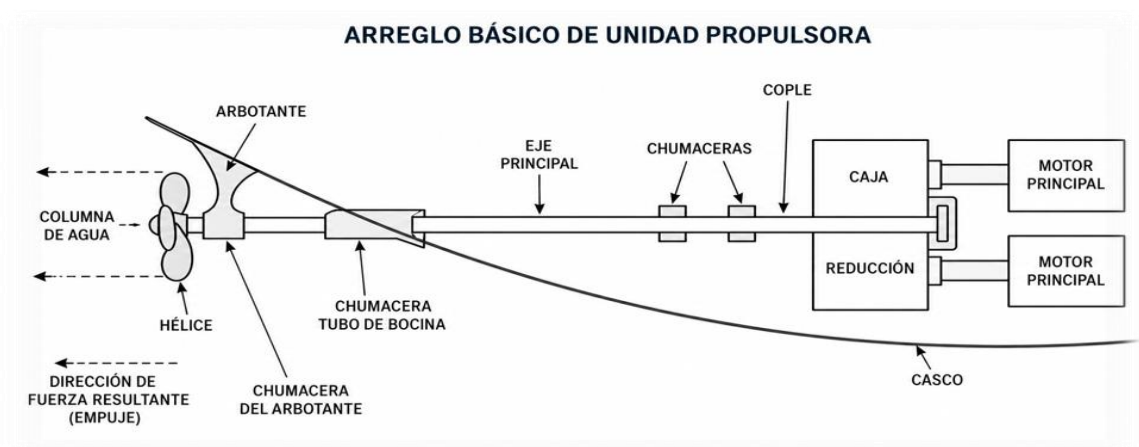
*Supervisor de Electricidad/Electrónica, en este caso el Ing. Yesid Gaviria, con más de 10 años en la ejecución de mantenimiento, reparación y construcción de embarcaciones navales.

*Ingeniero de Planeación -Gerencia, en este caso es el JTR/ Miguel Pastor con más de 20 años.

En la primera reunión realizada, teniendo en cuenta la experiencia de todos los participantes, fichas técnicas de los equipos, base de datos recolectadas y fallas más frecuentes, se realiza diagrama funcional del sistema de propulsión de una fragata. Ver **Figuras 19. y 20.** En estas se muestran los diferentes subsistemas y componentes básicos del sistema de propulsión en una fragata.

Figura 19

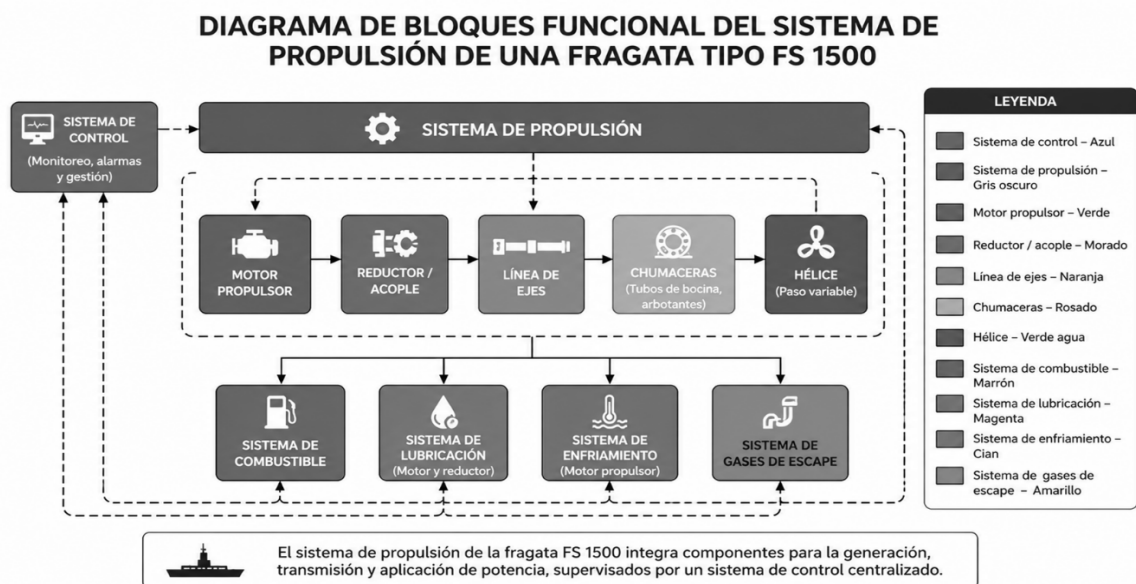
Arreglo básico de unidad Propulsora



Nota. Adaptado de slideshare 2025.

Figura 20

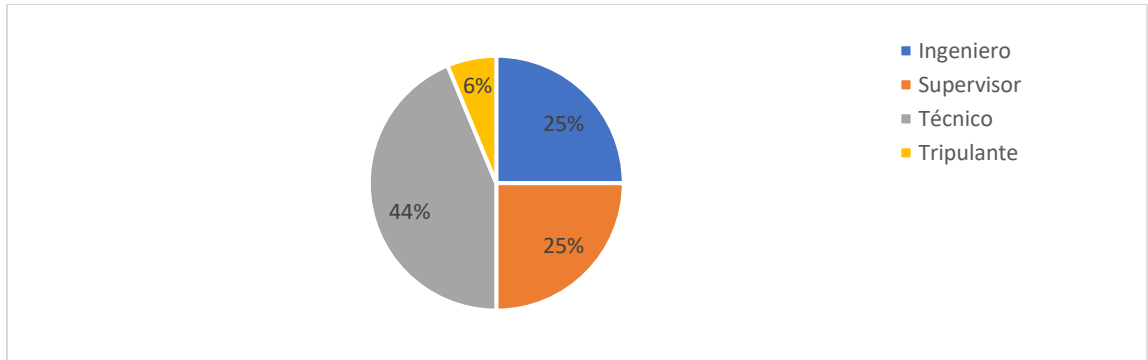
Diagrama de bloques Sistema de propulsión y auxiliares para una fragata tipo FS 1500



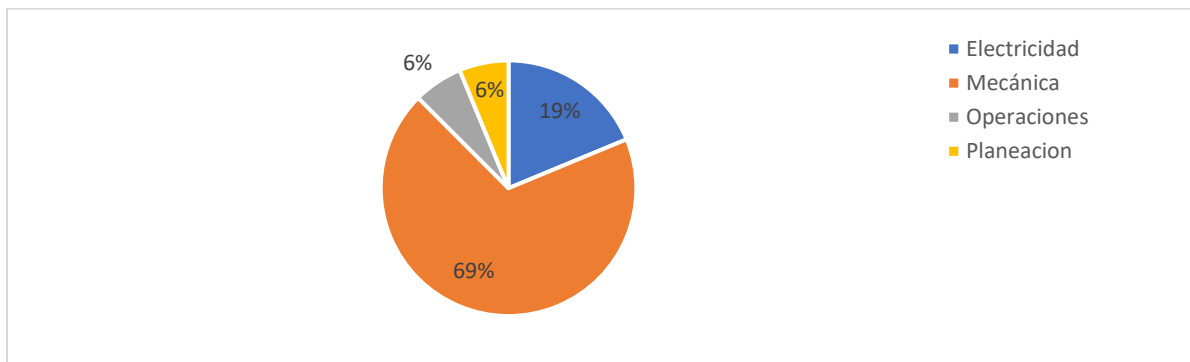
Adicionalmente, se realiza encuesta completa de las fallas recurrentes en el sistema de propulsión de una fragata, con el fin de complementar los datos obtenidos en la base de datos, con la experiencia adquirida día a día por los trabajadores en campo, Ver las **Figuras 21. y 22.** Donde se observa que dentro del personal encuestado hay presencia ingenieros, supervisores, técnicos de la corporación y tripulantes de la unidad en estudio, aportando una mayor participación el departamento de mecánica con un 69%.

Figura 21

% de participantes en encuesta por cargos

**Figura 22**

% de participación en encuesta por departamentos



En la **Tabla 9**. Se pueden observar los resultados obtenidos de la encuesta realizada tanto a personal técnico, profesional y tripulantes con una experiencia de más de 10 años de experiencia en promedio en el mantenimiento, reparación y fabricación de embarcaciones navales, evidenciando que las fallas más recurrentes se presentan en el sistema de enfriamiento (corrosión en intercambiadores- 8 veces reportada como muy frecuente), sistema de combustible (obstrucción de filtros – 6 veces reportada como muy frecuente) y el sistema de lubricación (Fugas en el sistema – 6 veces reportada como muy frecuente)

Tabla 9*Análisis final de la encuesta*

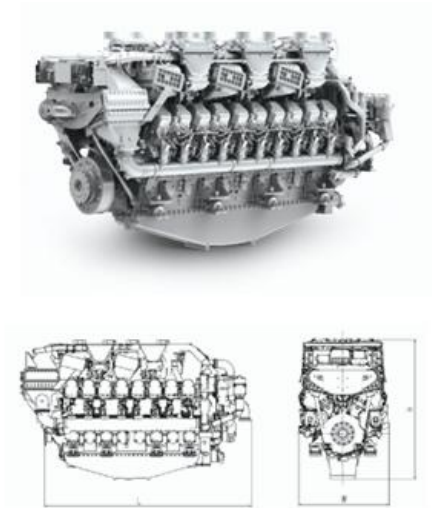
Falla	Subsistema	Veces reportada como "Frecuente" o "Muy frecuente"
Corrosión interna en intercambiadores	Enfriamiento	8 (crítica)
Obstrucción de filtros	Combustible	6 (crítica)
Fugas en el sistema	Lubricación	6 (crítica)

3.3 Árbol de fallas

En la segunda reunión, teniendo en cuenta resultados obtenidos de la encuesta, bases de datos recopilada, fichas técnicas de los equipos y diagrama funcional, se realiza en conjunto una verificación de parámetros operativos de los sistemas críticos, análisis de causa raíz de las fallas críticas y árbol de fallas.

3.4 Sistema de Enfriamiento de un Motor Propulsor MTU 1163 de una Fragata

El sistema de enfriamiento en el motor propulsor es necesario para mantener los componentes internos del motor, **Ver Figuras 23. Y 24.** Dentro de valores permisibles durante su operación y además para alargar su vida útil.

Figura 23*Motor MTU 1163*

Nota. Adaptado de Manual MTU 2025.

Los rangos normales de temperatura durante la operación para los componentes/subsistemas en un motor propulsor MTU 1163 son:

- Refrigerante (agua dulce tratada) 85 °C a 95 °C
- Aceite lubricante (antes del enfriador) 95 °C a 115 °C
- Aceite lubricante (después del enfriador) 70 °C a 90 °C
- Aire de admisión (después del intercooler - enfriador de aire de admisión comprimido) 40 °C a 55 °C
- Gases de escape 400 °C a 520 °C

El agua desmineralizada, desionizada o agua tratada también comúnmente llamada “*agua dulce*”, no es agua potable normal, es agua purificada con el fin de eliminar sales disueltas (iones de sodio, calcio, sulfuros, magnesio, entre otros), es utilizada para sistemas de enfriamiento en el sistema cerrado de enfriamiento de los motores MTU.

Cuando el agua de enfriamiento tratada del motor se produce en la fragata, se obtiene a partir del proceso descrito a continuación. El *agua desalada*, se obtiene en una planta desalinizadora pasando el agua de mar a través filtros de sedimentos y carbón para evitar partículas, sólidos o vida marina, luego bombas de alta presión impulsan el agua a través de filtros permeables. Posteriormente mediante un proceso de osmosis inversa (RO), son eliminados hasta el 99% de sales disueltas de sodio, calcio, magnesio, sulfuros, bacterias y virus, entre otros. El resultado del proceso anterior es agua desalada o permeada con una conductividad menor a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pero aún con trazas de minerales.

La MTU MTL 5044 es una norma interna de MTU Friedrichshafen que define los requisitos para lubricantes de motor diésel (aceites), incluyendo calidad de aceite para uso inicial y preservación contra corrosión. Según la norma MTU MTL 5044 los parámetros máximos de calidad final para el agua de enfriamiento tratada, que resulta en una mezcla de agua desmineralizada más el inhibidor de corrosión en una proporción de 50:50, son los siguientes:

Conductividad eléctrica	< 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Dureza total (Ca + Mg)	< 0.1 mmol/L (~5.6 ppm)
Cloruros (Cl^-)	< 50 ppm
pH (mezcla con refrigerante)	7.5 – 8.5
Silicatos (SiO_2)	< 20 ppm

Con el fin de cumplir los parámetros exigidos para el correcto funcionamiento del motor, según la norma MTL 5044, se debe complementar el proceso de desalinización con un sistema de resinas de intercambio iónico, donde en una columna catiónica se produce un intercambio de iones positivos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) por H^+ , en la columna aniónica el intercambio de iones negativos por (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) por OH^- . La reacción resultante $\text{H}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O}$ produce agua químicamente pura, desmineralizada de alta pureza (< 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sin sales, ni iones corrosivos.

El uso de agua tratada para el sistema cerrado de enfriamiento trae consigo los siguientes beneficios: Protege de la corrosión a los componentes internos del motor, evita la aparición de incrustaciones o sarro, minimiza el riesgo de deterioro o taponamiento en los intercambiadores de placas por precipitados minerales o reacciones químicas con el inhibidor, disminuye el riesgo de corrosión electrolítica o corriente galvánica entre metales distintos en contacto con el agua tratada, evita fallas por sobrecalentamiento, obstrucciones internas, pérdida de eficiencia térmica y daños en válvulas, bombas o camisas.

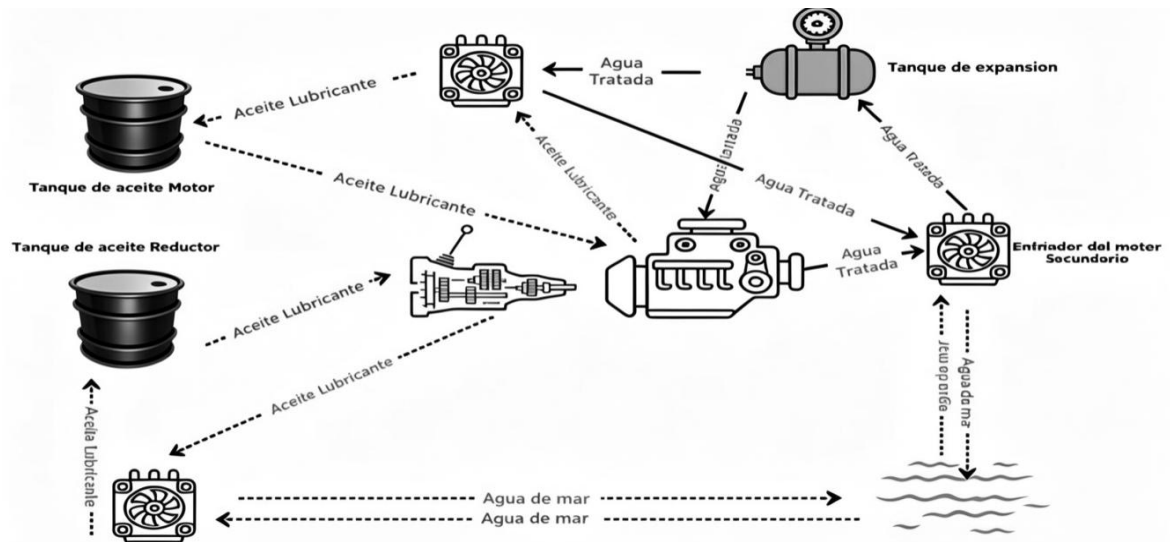
El inhibidor de corrosión más comúnmente usado en el sistema de enfriamiento cerrado del motor propulsor MTU 1163 es el Glysantin® G48 (fabricado por BASF), recomendado y certificado por MTU para motores marinos 1163, contiene etilenglicol + aditivos (silicatos, boratos, fosfatos), proporcionando una protección contra la corrosión, estabilidad térmica y prevención de la cavitación.

Teniendo en cuenta el manual de operación y mantenimiento para motores MTU, la capacidad aproximada del sistema cerrado (agua tratada + inhibidor) es la siguiente:

Para el motor MTU 16V 1163 M94 solo bloque motor, la capacidad es de 300 a 350 litros aproximados, si se incluyen intercoolers, líneas externas y enfriadores la capacidad aumenta entre 400 a 450 litros aproximados y el sistema completo por motor en una fragata objeto de este estudio es de aproximadamente 450 a 500 litros.

Figura 24

Proceso de enfriamiento y lubricación Motor Propulsor



El sistema de enfriamiento de un motor MTU 1163 se divide en dos partes principales:

3.4.1 Sistema de enfriamiento cerrado (Agua dulce o tratada)

- Este sistema cerrado utiliza una mezcla de agua desmineralizada o desionizada más un inhibidor de corrosión, esta es direccionada a través de dos rutas: una que pasa a través del bloque del motor, culata; y otra ruta que pasa por el enfriador de aceite, ambas corrientes descargan al enfriador de motor secundario. Previo a la distribución de las corrientes se tiene un tanque de expansión (compensación) que sirve de almacenamiento y regulación del volumen de agua manejada por los circuitos. Ambos circuitos impulsados por una bomba accionada por el motor propulsor durante su operación.
- Al circular el agua tratada por los componentes internos del motor absorbe el calor y dependiendo de la temperatura censada por los termostatos se regula el flujo de esta hacia el intercambiador de placas o tubular (enfriador secundario).

- El enfriador secundario cede el calor al ambiente por medio de la circulación de agua de mar.

3.4.2 Sistema de enfriamiento abierto (Agua de mar)

- En este sistema se utiliza agua de mar que es succionada por una bomba desde la caja de mar del buque, pasando a través del filtro de caja de mar para evitar el ingreso de partículas o vida marina al sistema que podrían afectar los componentes internos.
- Luego el agua de mar es direccionada a través de tuberías hacia el intercambiador de placas o tubular (enfriador secundario), donde al entrar en contacto con los serpentines por los cuales fluye agua tratada (desionizada) a una mayor temperatura, se produce un intercambio de calor, el agua de mar aumenta su temperatura para luego ser direccionadas a las descargas laterales del buque hacia el mar.

3.4.3 Corrosión en los Sistemas de Enfriamiento del Motor MTU 16V 1163 M94

El motor emplea dos sistemas de enfriamiento esenciales para su operación: un sistema cerrado con agua tratada y un sistema abierto que utiliza agua de mar. Ambos sistemas, a pesar de sus diferencias en diseño y funcionamiento, están expuestos al fenómeno de la corrosión, el cual puede comprometer seriamente la eficiencia térmica, la integridad estructural de los componentes y la seguridad operativa del buque si no se controla de manera adecuada.

3.4.4 Corrosión en el Sistema Cerrado de Enfriamiento

El sistema cerrado circula agua desmineralizada combinada con aditivos anticorrosivos, es un circuito hermético que recorre elementos críticos del motor, como camisas de cilindro,

intercambiadores internos, culatas y bombas. Bajo condiciones normales de operación, este sistema presenta bajo riesgo de corrosión, ya que está diseñado para mantener un entorno químicamente estable. No obstante, pueden presentarse ciertas condiciones que propicien el inicio del deterioro por corrosión:

- Presencia de oxígeno disuelto: puede ingresar durante el llenado del sistema o por micro fugas. Su interacción con metales como el hierro produce óxidos que afectan la superficie interna de los conductos.
- Uso de agua inadecuada o ausencia de inhibidores: si se emplea agua con minerales disueltos, o si los aditivos pierden efectividad con el tiempo, se generan reacciones químicas que favorecen la oxidación.
- Corrosión galvánica: en presencia de metales distintos (como aluminio, acero y cobre) y un electrolito con conductividad elevada, puede establecerse una celda galvánica interna, en la que uno de los metales se degrada más rápidamente.
- Sobrecalentamiento localizado: en zonas donde el aditivo pierde sus propiedades protectoras por temperatura excesiva, el metal queda expuesto, facilitando la corrosión localizada.

La consecuencia de estos factores puede ser la formación de herrumbre, depósitos sólidos, picaduras, obstrucciones internas y disminución de la eficiencia del intercambio térmico, lo que puede derivar en fallas mayores si no se corrige oportunamente.

3.4.5 Corrosión en el Sistema Abierto de Enfriamiento

El sistema abierto emplea agua de mar, la cual es captada desde el exterior, circula a través de los intercambiadores de calor y se descarga nuevamente al medio marino. Este sistema

está permanentemente expuesto a un entorno agresivo, razón por la cual es inherentemente más vulnerable a la corrosión. Los principales mecanismos corrosivos en este circuito incluyen:

- Alta concentración de cloruros: los iones de cloro contenidos en el agua de mar atacan las superficies metálicas, generando corrosión por picaduras o penetrante (pitting), que puede afectar tuberías, válvulas e intercambiadores.
- Oxígeno disuelto: el contacto continuo con oxígeno presente en el agua marina acelera procesos de oxidación de metales como acero o aluminio.
- Corrosión galvánica: cuando se combinan metales diferentes en contacto eléctrico (por ejemplo, acero inoxidable y bronce) y en presencia del agua salada, se forma una celda galvánica que favorece la degradación del metal menos noble.
- Cavitación: en componentes como bombas o codos donde hay variaciones rápidas de presión, se generan burbujas que colapsan violentamente, erosionando la superficie metálica y dejando áreas vulnerables a la corrosión.
- Incrustaciones biológicas: organismos marinos pueden adherirse a las superficies internas, generando microambientes que promueven la corrosión localizada o microbiológica.

Para mitigar estos efectos, se emplean ánodos de sacrificio, comúnmente fabricados en zinc, los cuales actúan como elementos protectores al corroerse en lugar de las superficies metálicas del sistema expuestas al agua de mar. Adicionalmente, en algunas unidades navales se utilizan sistemas activos de protección catódica, como los ánodos Cathelco, que funcionan mediante la aplicación de una corriente eléctrica controlada para inhibir la corrosión galvánica y reducir la formación de incrustaciones marinas. Estos sistemas resultan especialmente efectivos en cajas de mar, intercambiadores de calor y tomas de agua. Asimismo, se seleccionan

materiales resistentes a la corrosión marina, como el cuproníquel, el bronce naval y el acero inoxidable de calidad marina, que ofrecen una mayor durabilidad en entornos salinos agresivos.

3.5 Sistema de Enfriamiento del Aceite de Lubricación del Motor MTU 1163

El sistema de lubricación (figura 23), cumple funciones vitales para la protección y funcionamiento eficiente del motor. A través del aceite lubricante, se reduce la fricción entre partes móviles, se disipa calor, se limpian residuos internos y se previene el desgaste prematuro. Para asegurar que el aceite mantenga sus propiedades fisicoquímicas, este debe ser enfriado constantemente mediante un sistema diseñado para tal fin.

El enfriamiento del aceite se lleva a cabo utilizando un intercambiador de calor aceite–agua, que forma parte de un sistema cerrado de enfriamiento con agua tratada. Aunque se trata de un circuito cerrado, pueden presentarse fenómenos de corrosión interna que afecten negativamente el rendimiento del sistema, generando pérdidas térmicas, contaminación cruzada y fallas mecánicas.

3.5.1 Descripción del sistema

El sistema de lubricación del motor MTU 1163 funciona mediante un circuito presurizado donde el aceite es impulsado por una bomba hacia todos los componentes internos que requieren lubricación. Una vez que el aceite ha absorbido parte del calor generado en el motor, es dirigido hacia un intercambiador de calor, donde se enfría antes de volver a circular.

Este intercambiador transfiere el calor del aceite al agua tratada del sistema cerrado. A su vez, esta agua se enfría mediante un segundo intercambiador donde se emplea agua de mar del sistema abierto como disipador térmico. Este proceso permite mantener la temperatura del

aceite dentro del rango de funcionamiento recomendado por el fabricante, garantizando la eficiencia y seguridad del sistema.

Proceso de corrosión en el sistema de enfriamiento del aceite

Aunque el sistema trabaja con agua tratada y en condiciones controladas, puede presentarse corrosión interna por diferentes mecanismos, especialmente si no se cumplen los procedimientos adecuados de mantenimiento o si ocurren contaminaciones accidentales. A continuación, se describen los principales tipos de corrosión que pueden afectar este sistema:

- Corrosión por oxígeno disuelto: Durante el llenado inicial del sistema o en situaciones donde haya fugas de aire, puede incorporarse oxígeno al circuito cerrado. Este oxígeno, al reaccionar con las superficies metálicas del intercambiador y las tuberías, origina óxidos que deterioran las paredes internas, reducen la transferencia térmica y pueden generar incrustaciones.
 - Corrosión galvánica: Este tipo de corrosión ocurre cuando metales distintos, como acero al carbono y cobre, están en contacto dentro del sistema con un fluido conductor (agua con cierta conductividad). Se forma así una celda galvánica en la que uno de los metales actúa como ánodo y se corroe más rápidamente.
 - Corrosión química: El uso de agua no tratada, con alto contenido de minerales o sin los aditivos inhibidores apropiados, puede alterar el pH del sistema, facilitando la corrosión de superficies metálicas. La corrosión química también puede verse favorecida por el uso de aditivos incompatibles con los materiales del sistema.
- Erosión-corrosión: En zonas donde el flujo es rápido o presenta turbulencias como codos, válvulas o uniones puede producirse erosión mecánica de la capa protectora superficial, exponiendo el metal base a ataques corrosivos. Esta condición se agrava en presencia de partículas sólidas o alta temperatura.

- Entre las principales condiciones que incrementan el riesgo de corrosión en este sistema se encuentran:
- Ingreso de oxígeno por llenado o fuga de aire.
- Uso de agua no desmineralizada o sin inhibidores.
- Degradación de los aditivos químicos.
- Formación de pares galvánicos entre materiales metálicos distintos.
- Conductividad elevada del fluido refrigerante.
- Falta de purgas o ventilación del sistema durante mantenimiento.
- La aparición de corrosión en el sistema de enfriamiento del aceite puede generar los siguientes efectos negativos:
- Reducción de la capacidad de intercambio térmico del intercambiador.
- Formación de sedimentos o incrustaciones que bloquean el flujo.
- Fugas internas por picaduras o debilitamiento de las paredes.
- Contaminación del aceite lubricante con agua tratada.
- Sobre calentamiento del motor por ineficiencia del sistema de lubricación.
- Aumento en los costos operativos y tiempo fuera de servicio.

Las fugas en el sistema de lubricación pueden presentarse en diferentes puntos y por diversas causas. A continuación, se describen las más comunes:

3.5.2 Fugas en conexiones y uniones

Las conexiones roscadas, bridajes y acoples que unen tuberías y componentes del sistema están sometidas a vibraciones y cambios térmicos. Con el tiempo, estas condiciones pueden aflojar los elementos de fijación o deteriorar las juntas, provocando micro fugas o fugas visibles.

3.5.3 Fugas por fallas en retenes y sellos

Los retenes de ejes y sellos mecánicos evitan que el aceite escape en puntos donde hay movimiento rotatorio o axial. Si estos elementos se degradan por envejecimiento, desgaste, mal montaje o alta temperatura, pueden producirse fugas directas al exterior del motor o al compartimento del cárter.

3.5.4 Fugas por deterioro de tuberías y mangueras

Las tuberías metálicas o mangueras flexibles que transportan el aceite pueden sufrir agrietamientos, corrosión, abrasión externa o desprendimiento de abrazaderas. Esto puede generar pérdidas progresivas o repentinas del fluido, especialmente en zonas de difícil acceso o alta temperatura.

Fugas internas por fallas en el intercambiador de calor.

El intercambiador de calor del sistema de lubricación separa el aceite del refrigerante (agua tratada). Si hay fisuras internas o pérdida de estanqueidad entre los dos circuitos, puede haber mezcla de fluidos, lo cual representa una fuga interna no visible de inmediato, pero muy peligrosa para el motor.

Fugas por sobrepresión del sistema.

Si el sistema presenta una obstrucción en los filtros, válvulas o líneas, o si hay un mal funcionamiento del regulador de presión, el aceite puede alcanzar presiones anómalas. Esto puede provocar roturas en juntas o fisuras en componentes que normalmente soportan presiones más bajas.

Las fugas de aceite en el sistema de lubricación pueden tener consecuencias operativas y ambientales, tales como:

- Disminución del nivel de aceite en el tanque, lo que compromete la lubricación interna.

- Contaminación del medio ambiente marino si la fuga alcanza sentinas o se descarga al mar.
- Riesgo de incendio en caso de contacto con superficies calientes.
- Aumento de la temperatura del aceite por pérdida de presión o volumen.
- Desgaste acelerado de componentes internos por lubricación insuficiente.

3.5.5 Valores Operativos del sistema de lubricación del motor

En la **Tabla 10**. Se observa especificación requerida según la norma MTU MTL 5044 para los valores operativos del sistema de lubricación de un motor MTU 1163.

Tabla 10

Valores operativos del sistema de lubricación - Motor MTU 1163

Categoría	Parámetro	Valor / Especificación
Especificación del	Tipo de aceite recomendado	Aceite lubricante para motores de alta velocidad
	Viscosidad típica	SAE 40 (puede variar según clima y carga)
	Cenizas sulfatadas	≤ 1,00 %
	Índice de viscosidad (mínimo)	–
Presión del sistema:	En ralentí (mínimo)	1,0 – 1,5 bar
	Régimen nominal (carga media-alta)	4,5 – 6,0 bar
Temperatura del aceite:	Presión máxima (válvula de alivio)	7 – 7,5 bar
	A la entrada del motor	60 °C – 75 °C
	A la salida (retorno al sello)	80 °C – 95 °C
Caudal del sistema	Temperatura máxima permitida	105 °C
Capacidad del sistema	Caudal típico de la bomba de aceite	300 – 450 L/min (en régimen del motor)
	Capacidad total del circuito de aceite	> 350 litros
Mantenimiento	Tipo de sistema	Cárter seco, con tanque de almacenamiento externo
	Capacidad del tanque	Carga 650 – 750 litros / según análisis de laboratorio
	Reemplazo del filtro de aceite	Cada 1000 horas o durante mantenimiento mayor
	Inspección del intercambiador de calor	Cada 250 horas o cada 3 meses
	Análisis fisicoquímico del aceite	Según normativa interna

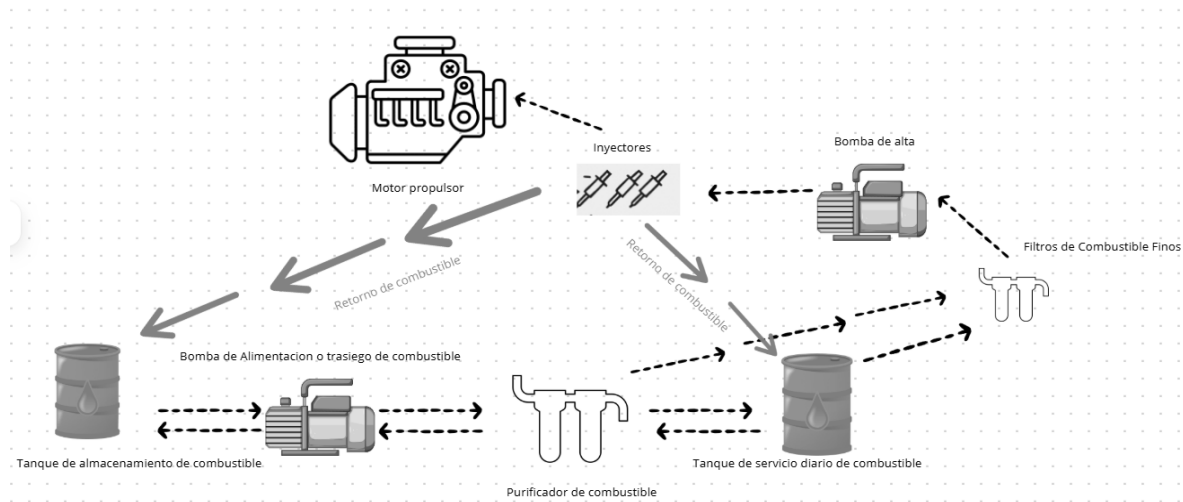
3.6 Sistema de Combustible

En la **Figura 25**. Se observa el sistema de combustible del motor propulsor MTU 1163 el cual cumple la función de almacenar, filtrar, transferir, inyectar y controlar el suministro de diésel hacia las cámaras de combustión. Este sistema está diseñado para garantizar un suministro constante y limpio de combustible bajo todas las condiciones de operación, incluyendo cargas

variables, arranques repetidos y altas exigencias térmicas, propias de motores marinos de alta potencia instalados en fragatas.

Figura 25

Sistema de Combustible Motor MTU 1163



3.6.1 Componentes principales del sistema de combustible

El sistema está compuesto por varias etapas y subsistemas que aseguran la correcta preparación y distribución del combustible. A continuación, se detallan sus elementos más relevantes:

3.6.2 Tanques de almacenamiento

Los tanques de combustible a bordo de la embarcación almacenan el diésel marino, cumpliendo funciones de reserva operativa. Están equipados con sensores de nivel, líneas de ventilación, válvulas de drenaje y sistemas de purga para evitar acumulación de agua y sedimentos.

3.6.3 Bombas de transferencia

Estas bombas permiten mover el combustible desde los tanques principales hacia tanques de servicio diario o hacia el sistema de alimentación del motor. Son controladas por el sistema de monitoreo de la planta propulsora.

3.6.4 Filtros separadores de agua y sedimentos

Antes de llegar al motor, el combustible pasa por filtros decantadores que eliminan partículas sólidas y agua libre, con el fin de proteger el sistema de inyección. Estos filtros pueden ser de doble etapa (grueso y fino) y son inspeccionados periódicamente.

3.6.5 Tanque de día (day tank)

Es un depósito auxiliar desde donde se suministra combustible directamente al motor. Permite asegurar la calidad del combustible antes de su entrada al sistema de alta presión, y facilita el control de consumo.

3.6.6 Bomba de alimentación (low pressure fuel pump)

Esta bomba proporciona la presión necesaria para enviar el combustible desde el tanque de día hacia el sistema de filtrado y a la bomba de inyección. Funciona generalmente en circuito cerrado con recirculación de excedentes.

3.6.7 Filtros finos de combustible

Ubicados antes de la bomba de inyección, retienen partículas muy pequeñas (5-10 micrones) para evitar obstrucciones o daños en los inyectores.

3.6.8 Bomba de inyección (high pressure fuel pump)

Este componente es responsable de generar la alta presión requerida para inyectar el combustible en las cámaras de combustión.

3.6.9 Inyectores

Los inyectores entregan el combustible finamente atomizado dentro de cada cilindro en el momento exacto. Están calibrados para garantizar presión y caudal óptimos, lo que es esencial para una combustión eficiente.

3.6.10 Retorno de combustible

El sistema incluye un circuito de retorno que lleva el exceso de combustible no utilizado de vuelta al tanque de día o al tanque principal, lo cual ayuda a estabilizar la presión y reducir el sobrecalentamiento del sistema.

3.6.11 Causas del Taponamiento de Filtros e Inyectores en el Sistema de Combustible

El taponamiento o bloqueo de filtros e inyectores en un motor diésel marino puede comprometer gravemente la eficiencia, confiabilidad y seguridad del sistema de propulsión. Este fenómeno se debe principalmente a la presencia de contaminantes físicos, químicos o microbiológicos en el combustible, así como a condiciones operativas deficientes. A continuación, se detallan las causas más comunes:

- Presencia de partículas sólidas en el combustible

El diésel puede contener impurezas sólidas como polvo, óxido, restos de pintura de tanques, o sedimentos generados por corrosión interna.

Estos residuos pueden acumularse en los filtros gruesos y finos, reduciendo el flujo y causando presión diferencial. Si los filtros se saturan, pueden romperse o permitir el paso de partículas hacia los inyectores.

Origen:

- Combustible de mala calidad.
- Limpieza deficiente de tanques.
- Desprendimiento de material interno en tuberías viejas.

- Contaminación por agua

El agua puede ingresar al combustible por condensación dentro de los tanques, fugas en ventilaciones o contaminación en el suministro.

El agua favorece la formación de lodos en los filtros, acelera la oxidación del combustible y puede afectar la atomización en los inyectores. Además, puede corroer componentes internos.

Origen:

- Fallas en sistemas de purga.
- Ausencia o mal funcionamiento de separadores agua-combustible.
- Almacenamiento prolongado sin control de temperatura.
- Formación de lodos y barnices (productos de oxidación)

El combustible envejecido sufre reacciones químicas que forman sedimentos gomosos, los cuales se depositan en líneas, filtros e inyectores.

Causa obstrucción progresiva de los filtros y afecta el patrón de inyección, reduciendo la eficiencia de la combustión.

Origen:

- Almacenamiento prolongado.
- Exposición del combustible al calor o al aire.
- Mezcla con combustibles incompatibles.
- Contaminación microbiológica (bacterias y hongos)

En presencia de agua, pueden proliferar microorganismos en el combustible que generan una masa viscosa (biofilm) difícil de filtrar.

Lo anterior causa obstrucción severa de filtros y degradación acelerada del combustible.

Origen:

- Presencia de agua en el interior del sistema.
- Tanques sucios.
- Mala rotación del inventario de combustible.
- Fallos en el sistema de filtración o mantenimiento inadecuado

El uso de filtros incompatibles, su instalación incorrecta o su reemplazo tardío reduce su eficacia.

Lo antes mencionado es causante del paso de contaminantes hacia la bomba de inyección y los inyectores, causando daños por abrasión o bloqueo.

Origen:

- Omisión de los intervalos de cambio recomendados.
- Uso de repuestos no certificados.
- Manipulación inapropiada al instalar los elementos filtrantes.
- Combustible incompatible o adulterado

El uso de diésel con aditivos no autorizados, solventes industriales o mezclas con residuos de otros hidrocarburos afecta su estabilidad química, generando depósitos gomosos o geles que pueden obstruir incluso los filtros de alta eficiencia.

Origen:

- Suministro de combustible fuera de norma.
- Contaminación cruzada con aceites o productos químicos.
- Temperaturas extremas

En climas fríos, ciertos componentes del diésel pueden cristalizar (parafinas), mientras que en climas cálidos pueden formarse barnices, ambos fenómenos provocan obstrucción de filtros o boquillas de inyección.

Origen:

- Operación sin aditivos anti-cristalización.
- Falta de precalentadores de combustible en climas fríos.

3.6.12 Valores Operativos del sistema de combustible del motor

En la **Tabla 11**. Se observa especificación requerida según la norma MTU MTL 5044 para los valores operativos del sistema de combustible de un motor MTU 1163.

Tabla 11

Valores operativos del sistema de Combustible

Categoría	Parámetro	Valor / Especificación
Tipo y calidad del combustible	Tipo de combustible	Diésel Marino DMA (Marine Gas Oil)
	Norma de referencia	ISO 8217 (grado DMA)
	Contenido máximo de azufre	0,10 % (MARPOL)
	Punto de inflamación	> 60 °C
	Contenido máximo de agua permitido	< 0,05 %
Presión del combustible	Viscosidad a 40 °C	1,5 – 6,0 cSt
	Después de bomba de alimentación	3,0 – 5,0 bar
	Entrada a bomba de inyección	4,5 – 6,5 bar
Temperatura del combustible	Sistema de alta presión (inyección)	Hasta 1000 bar
	Entrada al motor	40 °C – 60 °C
Caudal de	Temperatura máxima permitida	70 °C
	Caudal estimado	180 – 250 L/h por motor (según carga)
Filtrado y calidad del combustible	Caudal de retorno	50 – 120 L/h (30 – 50 % del caudal de entrada)
	Filtro separador de agua	Capacidad mínima: 30 micrones
	Filtro de combustible fino	5 – 10 micrones
	Eficiencia de filtrado	Retención > 98 % de partículas y agua libre
Capacidad del	Presión diferencial crítica	0,5 – 1,0 bar
	Tanque de día (según norma)	150 – 300 litros (variable por unidad naval)
	Sistema de alimentación del motor (líneas + equipo)	15 – 25 litros
Condiciones operativas y mantenimiento	Volumen de retorno estimado	50 – 120 litros/hora
	Drenaje de agua de filtros	Diario o cada 8 horas de operación
	Cambio de filtros finos	Cada 250 – 500 horas
	Verificación de presión del sistema	Cada turno o antes de zarpe
	Inspección visual de fugas	Diariamente
	Prueba de estanqueidad del circuito	Trimestral o según plan de mantenimiento

En las **Figuras 26. y 27**. Se muestra cómo diferentes problemas eléctricos y mecánicos pueden causar fallas en el sistema de propulsión. Este diagrama separa los diferentes subsistemas que lo componen y debajo de cada uno se presentan posibles fallas y sus causas. La idea es visualizar de forma ordenada qué eventos pueden generar una falla eléctrica o mecánica y cómo se relacionan entre sí.

Figura 26

Árbol de fallas en el sistema de propulsión-Aspectos Eléctricos

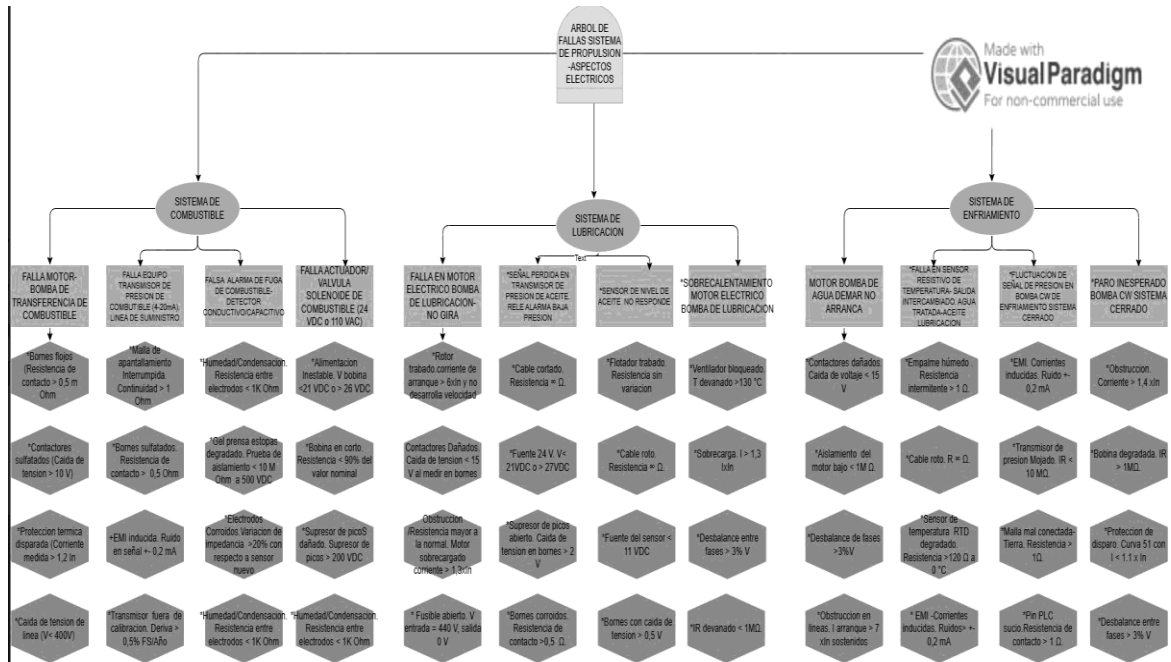
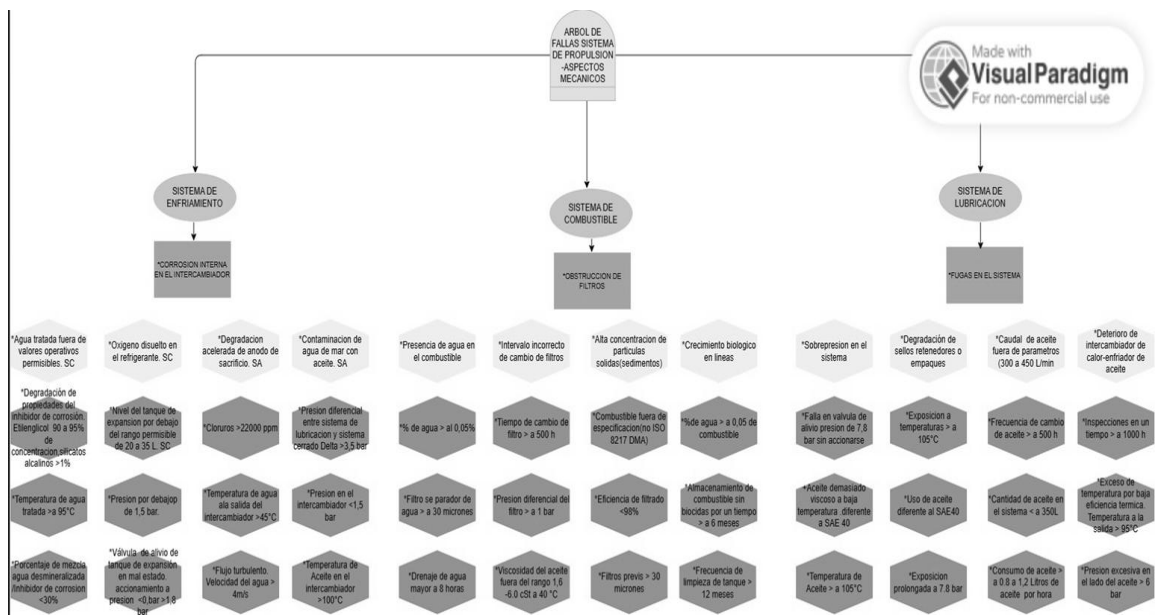


Figura 27

Árbol de fallas Sistema de propulsión - Aspectos mecánicos



La **Tabla 12**. Presenta un análisis de causa raíz para los problemas que pueden aparecer en un motor MTU 1163, enfocado en tres sistemas: enfriamiento, lubricación y combustible.

Tabla 12

Análisis de causa raíz-Motor MTU 1163

Falla Crítica	Tipo de Sistema	Causa Primaria	Subcausas	
Corrosión interna en intercambiador	Sistema de enfriamiento motor propulsor 1163		*Degradación de propiedades del inhibidor de corrosión(fuera de parametros permisibles) Etilenglicol 90 a 95 %de concentracion silicatos alcalinos < 1% Sales de acidos organicos >2%	
	Sistema cerrado Conductividad eléctrica del agua tratada< 100 µS/cm Dureza total (Ca + Mg)< 0.1 mmol/L (15.6 ppm) Cloruros (Cl⁻)< 50 ppm pH (mezcla con refrigerante)7.5 - 8.5 Silicatos (SiO₂)< 20 ppm Presión mínima en frío (antes del arranque) 0.5- 1bar Presión nominal en régimen normal 1.5 a 2.5 bar (motor caliente) <95 °C Presión máxima admisible 3,5 a 4 bar Presión de apertura de la válvula de sobrepresión del tanque de expansión 2,8 a 3.2 bar	Sistema cerrado (Agua Tratada con valores operativos)	Temperatura del agua tratada > a 95°C	
	cantidad de oxígeno optima 0,1 mg/L (PPM) Presion de accionamiento optimo valvula de alivio tanque de expansión de 0,8-1,8bar	Sistema cerrado (Oxígeno disuelto en el refrigerante)	Presion por debajo de 1,5 bar	Porcentaje de mezcla de desmineralizada/inhibidor de corrosion fuera de valor permisible < 30% Nivel del tanque de expansion fuera del rango permisible (20 a 35 Litros) del 30 al 60% del volumen total
	Sistema abierto % oxígeno disuelto en < 19.000 ppm Velocidad optima del agua de mar 1-2,5m/s Temperatura permisible de agua de mar a la salida del intercambiador 20 a 35°C Cantidad permisible de aceite 0,5mg/L	Sistema abierto (Degradacion acelerada de anodo de sacrificio)	Cloruros >22.000 ppm Temperatura del agua Mayor a la salida del intercambiador > 45°C Flujo turbulento velocidad del agua mayor a 4 m/s	Valvula de alivio del tanque de expansion en mal estado, accionamiento a Presion < 0,8bar o > 1,8bar
		Sistema abierto (Contaminacion de agua de mar con aceite)	Presion diferencial entre sistema de lubricacion sdel motor y el sistema de enfriamiento cerrado >3,5 bar presion en el intercambiador <1,5bar. Perdida de sellado-cruce de aceite -agua de mar Temperatura de aceite en el intercambiador >100°C, genera microfiltracion de aceite	

Falla Crítica	Tipo de Sistema	Causa Primaria	Subcausas	
Obstrucción de filtros	Sistema de Combustible Características Generales - Tipo de combustible: Diésel Marino DMA (ISO 8217) - Contenido máximo de azufre: 0,10% (según MARPOL) - Punto de inflamación mínimo: > 60 °C - Contenido de agua permitido: < 0,05% - Viscosidad a 40 °C: 1,5 – 6 cSt 2. Presiones del Sistema - Presión después de bomba de alimentación: 3,0 – 5,0 bar - Presión de entrada al sistema de inyección: 4,5 – 6,5 bar - Presión del sistema de inyección: 150 – 1.800 bar 3. Temperatura y Caudal - Temperatura de entrada al motor: 40 °C – 60 °C - Caudal estimado de consumo por motor: 180 – 250 l/h - Caudal de retorno estimado: 50 – 120 l/h (30 – 50%) 4. Filtración del Combustible - Filtro separador de agua: 30 micrones - Filtro de combustible fino: 1 – 10 micrones - Eficiencia de filtrado: > 98% de partículas de 10 micrones - Presión diferencial crítica para cambio de filtros: 0,5 – 1,0 bar 5. Mantenimiento y Verificación - Capacidad del sistema de alimentación: 150 – 300 litros/hora - Volumen estimado en líneas + retorno: 15 – 25 litros / 50 – 120 litros/hora - Frecuencia de cambio de filtros finos: Cada 250 – 500 horas - Verificación de presión: Cada turno de zarpe - Inspección visual de fugas: Diaria o cada 8 horas - Prueba de estanqueidad: Trimestral	Presencia de agua en el combustible Intervalo incorrecto de cambio de filtros Alta concentración de partículas solidas (sedimentos)	*Contenido de agua superior al 0,05% *filtro separador de agua de > 30 micrones *Drenaje de agua > a 8 horas *Tiempo de cambio de filtros > a 500 horas *Presion diferencia en el filtro > a 1 bar *viscosidad del aceite fuera de este rango (1,5–6,0 cSt a 40 °C.) *Eficiencia de filtrado < al 98% *Combustible fuera de especificacion (no ISO 8217 - DMA) * Filtros previos >30 micrones, afectan filtros finos 5-15 Micrones *Porcentaje de agua > al 0,05% de combustible (esto crea sludge) *Almacenamiento de combustible sin biocidas un tiempo > a 6 meses	
		Crecimiento biológico en líneas	*Frecuencia de limpieza de tanque >a 12 meses	

Falla Crítica	Tipo de Sistema	Causa Primaria	Subcausas
Fugas en el sistema (lubricación)	Sistema de lubricación 1. Especificación del Aceite - Tipo recomendado: Aceite lubricante para motores diésel de alta velocidad - Viscosidad típica: SAE 40 (ajustable según clima y carga) - Cenizas sulfatadas: < 1.0 % - Índice de viscosidad mínimo: 95 2. Presión del Sistema - En ralentí (mínimo): 1.0 – 1.5 bar - Régimen nominal (carga media-alta): 4.5 – 6.0 bar - Presión máxima (válvula de alivio): ~7.5 bar 3. Temperatura del Aceite - Entrada al motor: 60 °C – 75 °C - Salida (retorno al sistema): 80 °C – 95 °C - Temperatura máxima permitida: 100 °C 4. Caudal del Sistema - Caudal típico de la bomba de aceite: 300 – 450 L/min (según régimen del motor) 5. Capacidad del Sistema - Capacidad total de aceite: ~350 litros 6. Mantenimiento Recomendado - Cambio de aceite: Cada 500 – 750 horas o según análisis - Reemplazo de filtros: Cada 250 – 500 horas o al cambiar el aceite - Inspección del intercambiador de calor: Cada 1000 horas o durante mantenimiento mayor - Análisis fisicoquímico del aceite: Cada 250 horas o cada 3 meses	Sobrepresión en el sistema Degradación de sellos, retenedores o empaques Caudal de aceite fuera de parámetros (Caudal típico: 300–450 L/min) Deterioro del intercambiador de calor (enfriador de aceite)	*Falla de válvula de alivio, presión > a 7,8 bar sin accionarse *Aceite demasiado viscoso a temperatura baja (diferente a la viscosidad SAE 40) *Temperatura de aceite mayor a 105°C, degrada las propiedades del aceite y produce lodos *Exposición a temperaturas > a 105°C *Uso de aceite diferente al SAE 40 *Exposición prolongada a presiones de aceite > a 7.8 bar *Frecuencia de cambio de filtros de aceite > a 500 horas *Cantidad total de aceite en el sistema < a 350 litros *Consumo de aceite > a 0,8 a 1,2 litros de aceite por hora. *Inspecciones en un tiempo > a 1000 horas *Exceso de temperatura por baja eficiencia térmica (temperatura a la salida > a 95°C *Presión excesiva en el lado del aceite > a 6 bar

3.7 Análisis de Hipótesis

En la tercera reunión, con los datos recopilados, valores operativos de los sistemas críticos, diagrama de causa raíz, se analizan en conjunto las hipótesis de las posibles causas de la ocurrencia de las fallas más recurrentes, se realiza un FMECA, complementado con un listado de actividades de mantenimiento recomendadas para evitar la ocurrencia de fallas críticas en los motores propulsores MTU 1163 de una fragata.

En la **Tabla 13**. Se muestra el Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA), complementado con un análisis de fallas mecánicas (FMA), se aplicó a los sistemas de enfriamiento, lubricación y combustible del motor propulsor MTU 16V 1163 M94. Este estudio se basó en datos operativos reales, encuestas realizadas a personal especializado en la parte naval en promedio con 10 años de experiencia, reportes técnicos de mantenimiento, y prácticas normadas por el fabricante (MTU) para condiciones navales. El objetivo principal fue identificar fallas críticas recurrentes, sus causas raíz, evaluar su impacto mediante el cálculo del RPN (Risk Priority Number) y establecer acciones de mantenimiento con frecuencia específica para prevenir su ocurrencia.

Tabla 13

FMECA motor propulsor MTU 1163

ID	Falla Crítica	Modo de Falla	Causa Primaria	Subcausas (Datos Técnicos Reales)	Efectos Potenciales	S	O	D	RPN	Nivel de Criticidad	Actividades de Mantenimiento Recomendadas (con Frecuencia)
F1	Corrosión interna en intercambiador	Degradación progresiva interna	Agua tratada fuera de especificación	Etilenglicol < 90% o > 95% – Silicatos > 20 ppm – Sales orgánicas > 2%	Pérdida de eficiencia térmica, perforación	9	6	5	270	Muy Alta	*Análisis químico del refrigerante (cada 500 h) Se verifica el pH, contenido de glicol, inhibidores, silicato y otras sales * Reposición de inhibidores (según análisis), cada 500 horas. basado en el resultado del análisis químico del refrigerante *Uso mezcla según MTL 5048(Cada llenado y reposición) * Control con refractómetro, cada 250 horas, se verifica que el porcentaje de etilenglicol es entre 90%-95% *Inspección visual de intercambiador(cada 250 h)
F2	Corrosión interna en intercambiador	Alta temperatura del refrigerante	Agua salida >95 °C	Inhibidores < 30% – Flujo turbulento > 4 m/s	Aumento de presión, cavitación, deterioro	8	6	6	288	Muy Alta	* Control válvula termostática (250 h) *Verificación sensores de temperatura (250 h) *Medición de caudal con flujómetro (500 h) * Limpieza de pasajes del intercambiador(cada 1000 h o según resultado de inspección) *Monitoreo permanente vía SCADA (sistema de control de y adquisición de datos, verificación de P, Q, T)
F3	Corrosión interna en intercambiador	Contaminación con aceite	Fuga en intercambiador aceite-agua	Contenido aceite > 0.5 mg/L – Agua > 100 °C	Taponamiento, pérdida de transferencia térmica	9	5	5	225	Muy Alta	*Verificación presión diferencial (semanal) *Pruebas hidrostáticas (1000 h) *Sustitución de juntas (2000 h) *Análisis hidrocarburos en agua, cada (250 h o mensual) *Revisión de fugas (diaria)
F4	Obstrucción de filtros	Filtración inadecuada de agua	Agua > 0.05%, filtrado >30 micras	Separador ineficiente – Drenaje sin purga >8 h	Baja potencia, daños en inyectores	7	6	5	210	Muy Alta	*Revisión vaso separador (diaria) * Cambio cartucho separador (250 h) *Drenaje manual (cada 8 h) *Uso de prefiltros 10 micras según ISO 5217, antes de la bomba de transferencia de combustible *Test kit de agua dulce, entre 100 a 250 h
F5	Obstrucción de filtros	Intervalo excesivo de cambio	Filtro >500 h o ΔP >1 bar	Viscosidad fuera de 1.5–6.0 cSt a 40 °C	Caída de presión, pérdida de suministro	7	5	4	140	Alta	*Cambio filtros (250-400 h) *Medición ΔP (semanal) *Análisis viscosidad en laboratorio, cada 500 h o mensual *Control temperatura combustible, permanente con el control SCADA
F6	Obstrucción de filtros	Contaminación con partículas	Combustible fuera norma ISO 8217	Sedimentos >5–15 micras – Eficiencia <98%	Taponamiento, posible parada	8	4	4	128	Alta	*Filtro separador 5 micras previo a tanque de almacenamiento de combustible o antes del sistema de filtrado del motor *Análisis de sedimentos cada (300 h) *Revisión visual previa carga de combustible *Cambio de prefiltro cada (250 h)
F7	Obstrucción de filtros	Crecimiento biológico	Contenido biológico >0.05% (sludge)	Almacenamiento >6 meses sin biocida – Limpieza tanques >12 meses	Obstrucción de líneas, reducción de caudal	7	5	5	175	Muy Alta	*Dosisación de biocidas (cada carga) *Limpieza tanques (1000 h) *Revisión de sedimentos (250 h) *Filtrado en recirculación de 250 a 300 l(trimestral) *Análisis microbiológico (trimestral)
F8	Fugas de aceite	Sobrepresión en sistema	Válvula de alivio defectuosa	Presión >7.8 bar – T* >105 °C	Fugas por sellos, pérdida de lubricación	8	5	5	200	Muy Alta	*Prueba válvula alivio (250 h) *Control viscosidad (semanal) *Verificación de presión vía SCADA, continuo *Limpieza de conducto de alivio, cada (500 h) *Uso aceite SAE 40, cada carga o reposición *Cambio de empaques (500 h)
F9	Fugas de aceite	Falla en sellos/empaques	Aceite inadecuado o presión alta	SAE incorrecto – Presión >7.8 bar – T* >105 °C	Ingreso de aire, pérdida de presión	7	6	4	168	Alta	*Verificación presión máxima, semanal o vía SCADA *Uso aceite SAE 40, cada carga o reposición de aceite *Control T con sensores calibrados cada 250 horas o trimestral *Inspección visual (250 h)
F10	Fugas de aceite	Caudal fuera de parámetros	<300 o >450 l/min	Aceite <350 L – Consumo >0.8 L/h	Baja lubricación, sobrecalentamiento	9	4	4	144	Alta	*Verificación de nivel (cada guardia) *Análisis consumo diario *Revisión bomba de aceite (500 h) *Calibración de sensor – sonda/altímetro (1000 h)
F11	Fugas de aceite	Falla en intercambiador	Temperatura salida >95 °C o presión alta	Inspección >1000 h – Presión >6 bar	Contaminación cruzada, sobrecalentamiento	8	5	5	200	Muy Alta	*Inspección cada 1000 h *Control de presión (semanal) *Análisis T salida, continua por SCADA *Predictivo con ultrasonido, cada (1000 h) *Limpieza interna del intercambiador cada (500 h)

Para determinar la criticidad de los modos de falla identificados, se empleó el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (RPN, por sus siglas en inglés), el cual resulta de multiplicar tres factores: la severidad del efecto (S), la frecuencia estimada de ocurrencia (O) y la capacidad de detección del sistema (D).

Esta metodología de análisis se basa en prácticas ampliamente aceptadas en la industria para evaluar y priorizar riesgos, particularmente en procesos de mantenimiento, calidad y confiabilidad.





Los valores del RPN se interpretan dentro de una escala que clasifica el nivel de riesgo en cuatro categorías: bajo, moderado, alto y muy alto, ver **Tabla 14**. Esta clasificación permite enfocar los esfuerzos de mantenimiento y mejora en los elementos más críticos del sistema.

El RPN o Número de Prioridad del Riesgo, se calcula así:

$$\text{RPN} = \text{S} \times \text{O} \times \text{D}, \text{ y se interpreta según rangos de criticidad}$$

Tabla 14

Criterios para la Elaboración de Análisis de criticidad

RPN	Nivel de Riesgo	Código Color	Acción Requerida
1–80	Bajo	 Verde	Seguimiento normal
81–160	Moderado	 Amarillo	Mejora recomendada
161–240	Alto	 Naranja	Acción correctiva
241–1000	Muy Alto	 Rojo	Acción inmediata, rediseño o mantenimiento intensivo

3.7.1 Metodología

Selección de Sistemas Críticos: Se enfocó el análisis en los sistemas de enfriamiento, lubricación y combustible por su alta influencia en la operación segura del motor y su tasa histórica de fallos.

Recopilación de Datos Técnicos: Se utilizaron reportes de fallas, registros SCADA y especificaciones técnicas del fabricante.

Identificación de Modos de Falla: Cada modo de falla se definió con base en los efectos reales observados a bordo y su potencial impacto en la operación del motor.

Cálculo del RPN (Número de Prioridad de Riesgo):

S (Severidad): Se asignó del 1 al 10 según el impacto del modo de falla (por ejemplo, pérdida de propulsión, riesgo ambiental, daño catastrófico).

O (Ocurrencia): Basado en frecuencia estadística de ocurrencia en operación real.

D (Detección): Consideró la capacidad del sistema para detectar el fallo a tiempo mediante sensores, alarmas o inspección.

En este caso en particular para calcular el $RPN = S \times O \times D$, se clasificó la criticidad en tres niveles: Muy Alta (●), Alta (●), y Moderada (●).

Actividades de Mantenimiento Recomendadas: Se diseñaron con frecuencias técnicas (horas de operación, turnos, condiciones de uso) y con base en estándares internacionales (MTU MTL 5044/5048, ISO 8217, etc.).

3.7.2 Justificación de la Ponderación

La ponderación de Severidad (S) se estableció según el nivel de riesgo para la operación continua del motor (por ejemplo, fallas en el sistema de lubricación implican riesgo inmediato de daño mayor).

La Ocurrencia (O) se basó en frecuencia observada en registros de mantenimiento y encuestas de operadores y personal especializado, indicando cuántas veces por cada 1000 h de operación se presenta el modo de falla.

La Detección (D) considera si el fallo puede ser detectado mediante sistemas automáticos o requiere inspección manual; fallas con pobre detección aumentan el RPN.

3.7.3 Resultados Relevantes

Las fallas F1, F2 y F3 (corrosión interna en intercambiadores) presentaron los mayores RPN (>225), asociadas a la calidad del refrigerante, temperatura excesiva y contaminación cruzada con aceite.

Las fallas de obstrucción de filtros (F4, F5, F6, F7) mostraron RPN entre 128 y 210, indicando alto riesgo por una posible mala calidad de combustible, contaminación durante el cargue y/o falta de mantenimiento preventivo.

En el sistema de lubricación, las fugas por sobrepresión (F8) y por caudal fuera de parámetros (F10) reflejaron una criticidad alta, que justifica la implementación de sensores y pruebas funcionales frecuentes.

3.7.4 Conclusiones

Este FMECA-FMA permitió priorizar fallos por criticidad real, establecer acciones técnicas de mantenimiento preventivo y predictivo y proporcionar una base sustentada para decisiones de ingeniería de confiabilidad.

Las acciones propuestas (actividades específicas con frecuencia de ejecución) permiten una reducción efectiva del RPN y minimizan la ocurrencia de fallas catastróficas. Además, este enfoque es aplicable para integrar estrategias de mantenimiento centradas en la confiabilidad (RCM).

4.0 Simulación de la Implementación

Para la etapa de simulación se utiliza la aplicación de análisis llamada “TransData” esta es una herramienta académica diseñada para realizar análisis de datos mediante diferentes técnicas de procesamiento, clasificación y modelos de redes neuronales, adaptada y modificada por el Ing. David Fuentes para utilizar en este trabajo de grado. El programa funciona desde la línea de comandos y permite seleccionar el tipo de problema a resolver y el algoritmo que se desea aplicar sobre un conjunto de datos.

4.1 Proceso de extracción/codificación

Durante el proceso de extracción/codificación fueron realizados los siguientes pasos:

- Se realiza una copia del archivo original en Excel, utilizado en todas las etapas de este trabajo de grado (información de fragata, grupo constructivo, tipo de Mnto, costos ejecutados, TTR para el periodo de 5 años), se lleva al formato delimitado por comas.
- Se descarga e instala el Programa Transdata en el equipo de cómputo a utilizar durante el análisis y simulación.
- Se crea archivo maestro donde se indican los archivos que se van a procesar, el primero contiene los datos originales, segundo la secuencia de extracción/codificación y el tercero el archivo de salida con los datos extraídos/codificados. ver **Figura 28**

Figura 28

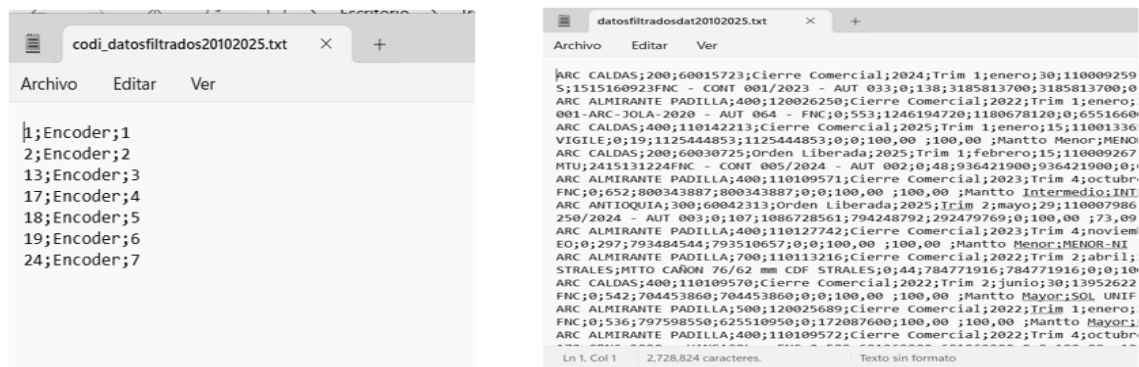
Proceso de extracción de columnas - codificación. Parte B



Se crea una carpeta que contenga los dos archivos mencionados en el ítem anterior, datos originales y secuencia de extracción, ver **Figura 29**.

Figura 29

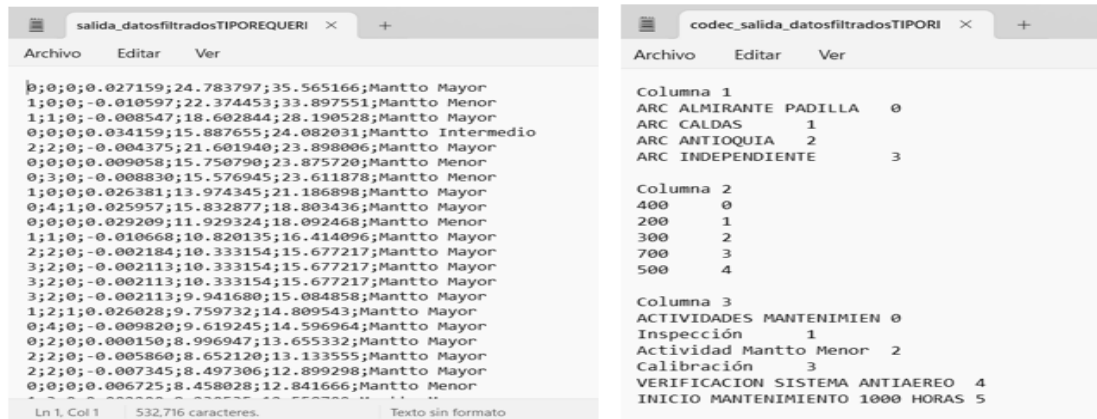
Proceso de extracción de columnas- codificación Parte C



Por ultimo utilizando el programa “TransData” y los comandos correctos se crea automaticamente una carpeta de salida que contiene dos archivos, el primero el archivo extraido/codificado (este se utiliza para el proceso de análisis- simulación mediante redes neuronales) y el segundo archivo es el codec (indica etiquetas de los datos filtrados/extraidos), ver **Figura 30**.

Figura 30

Proceso de extracción de columnas- codificación Parte D



4.2 Proceso de simulación mediante *TransData/DeepNetwork* (Entrenamiento, validación, aprendizaje, simulación)

Utilizando el ítem integrado de redes neuronales en *TransData* para el análisis de datos, junto con el archivo de datos originales codificado en el apartado anterior, se realiza entrenamiento y aprendizaje en el modelo cambiando variables importantes como las épocas o número de iteraciones, tasa de aprendizaje, numero de capas, numero de neuronas, buscando que los resultados del error sean lo más cercanos a cero posible.

Cuando independientemente de los valores de las variables determinantes digitados, el error es el mismo, se procede a dividir los datos originales codificados en dos partes aleatorias una parte del 70% para el entrenamiento y el 30% para la validación. Finalmente se realiza el proceso de validación de datos.

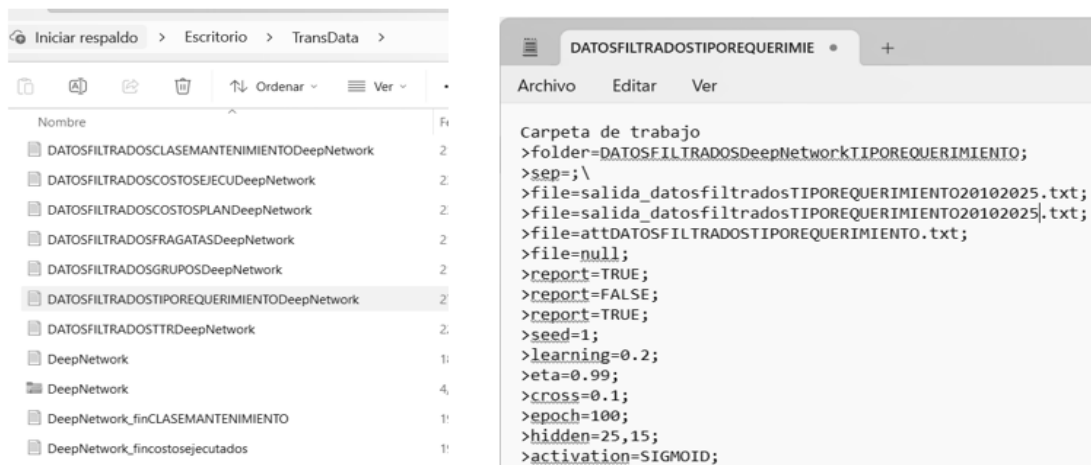
Durante el proceso de simulación fueron realizados los siguientes pasos:

En la carpeta *Transdata* se crea archivo .txt con la información de rutas y archivos requeridos para el test, cuyo nombre es, “**DATOSFILTRADOSTIPOREQUERIMIENTODeepNetwork**” y una carpeta con toda la

información “**DATOSFILTRADOSDeepNetworkTIPOREQUERIMIENTO**” (“inputs” y “outputs”), ver **Figura 31**.

Figura 31

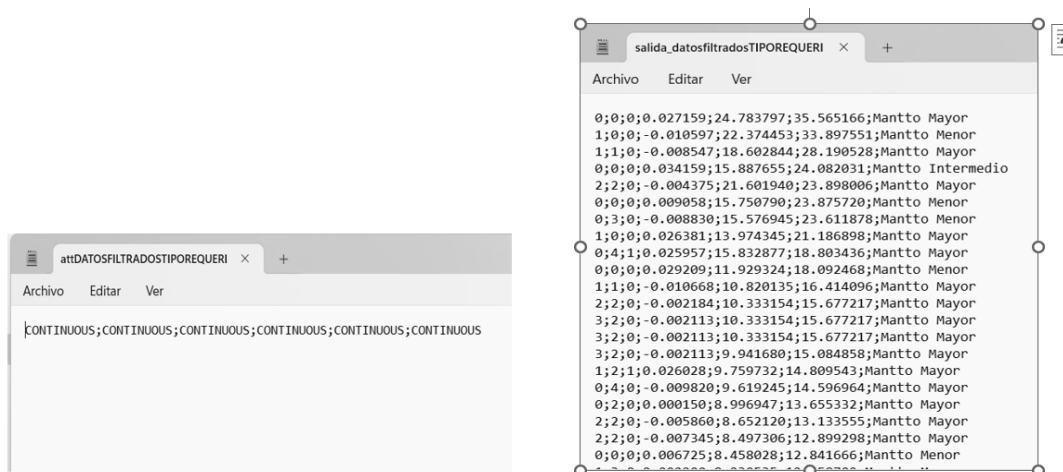
Proceso de simulación inicial Parte A. Archivo maestro para la prueba



En la carpeta inputs se crean dos archivos el primero muestra el tipo de datos que se analizaran, en este caso datos continuos, el segundo archivo contiene los datos originales codificados, ver **Figura 32**.

Figura 32

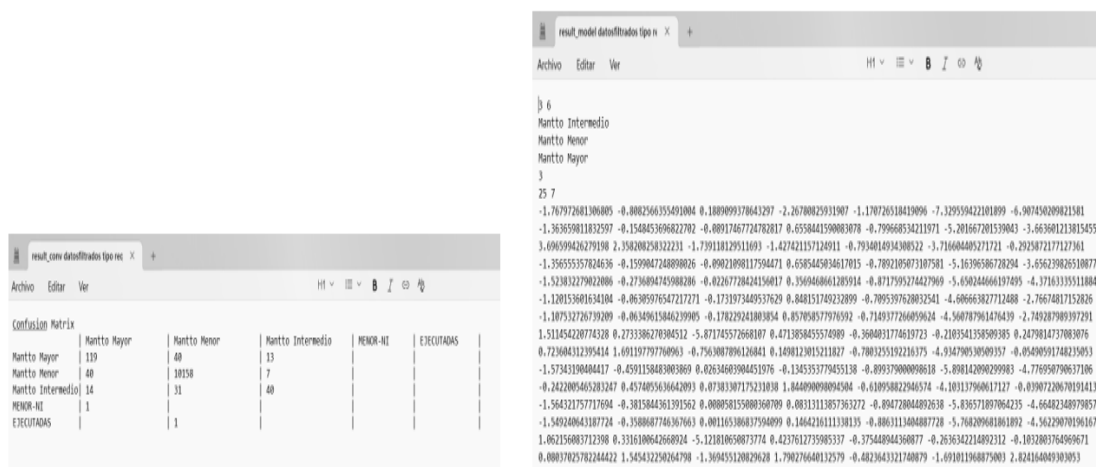
Proceso de simulación inicial Parte B. Tipo de datos y archivo codificado



Luego de los pasos anteriores, digitando correctamente los comandos del test en TransData se crea automáticamente en la carpeta de “DATOSFILTRADOSDeepNetworkTIPOREQUERIMIENTO” una subcarpeta de resultados de la simulación “outputs”, esta última contiene dos archivos, el primero es la matriz de confusión (contiene la cantidad de datos que son reconocidos o predichos por el modelo como correctos y la cantidad de datos que el modelo predice de manera incorrecta o en los cuales se confunde) y resultados predichos del modelo, ver **Figura 33**.

Figura 33

Proceso de simulación inicial Parte C, Resultados



Utilizando el programa de análisis de datos “JULIUS”, se realiza la división aleatoria de los datos utilizados durante la simulación inicial en dos partes (30 y 70%), los cuales se utilizaron para la validación de los resultados obtenidos inicialmente en “TransData”

Luego de realizar el proceso de análisis y validación de los datos iniciales con los archivos anteriores (30 y 70%), se obtuvo la siguiente Predicción Intermedia:

En la **Figura 34**. Se observa que según el resultado arrojado por la matriz de confusión el modelo predijo correctamente 3564 actividades de mantenimiento menor, 54 actividades de

mantenimiento mayor y solo una actividad de mantenimiento intermedio, los demás valores fueron predichos incorrectamente.

Figura 34

Proceso de Validación-Predicción (30 y 70%), Parte A, Matriz de confusión

	Mantto Menor	Mantto Mayor	Mantto Intermedio
Mantto Menor	3564	12	4
Mantto Mayor	53	54	9
Mantto Intermedio	28	1	1

En la **Figura 35**. Se observan los resultados del modelo para cada variable estudiada. con sus respectivos coeficientes.

Figura 35

Proceso de Validación-Predicción (30 y 70%), Parte B

Mantto Menor
Mantto Mayor
Mantto Intermedio

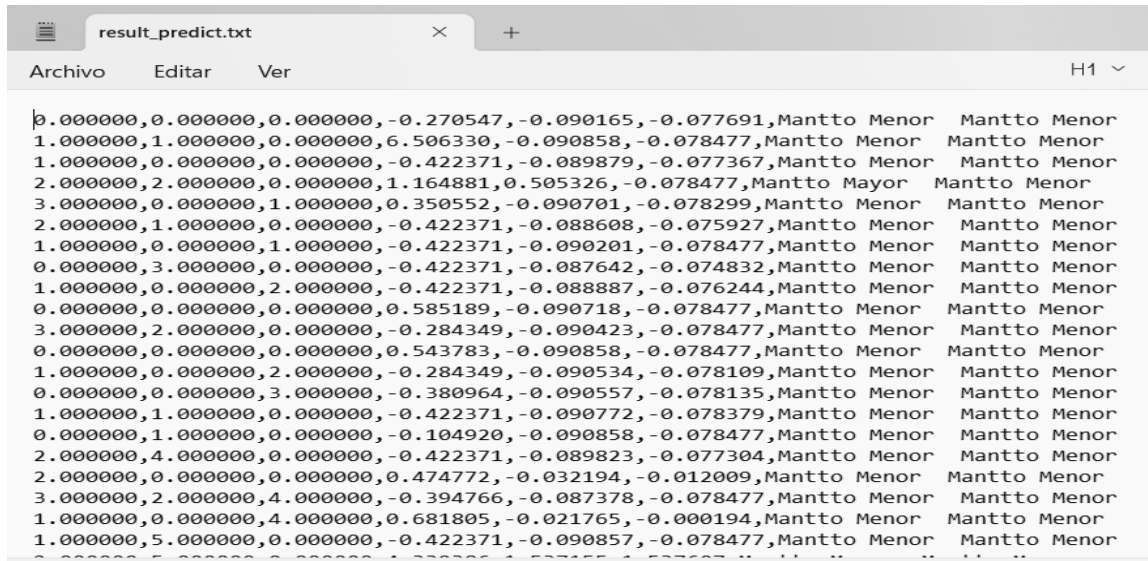
2
25 7

-1.268970852571129 -0.914239061219964 0.6186037801899432 0.04480353406797307 3.797993761143942 8.02895073223165 8.013527058016775
0.7892655859480452 -0.1097818560216994 -0.4792485856345576 0.197572201604132 -0.004548204577374615 9.892177725556186 9.504257938633422
-2.423340239957329 2.72653783284981 -0.02845479924601763 0.5678746347380533 -1.241178983529206 9.140256238617321 8.025009965165655
-2.614286078006076 -0.940017750377877 1.692969082542316 -1.335409976934055 8.136879679046359 6.008868874558967 5.532071258462819
0.2950189526708485 0.3719434632184684 -0.249186506822483 -0.0988155512612085 3.279389838241601 6.859925910971492 5.096071093536181
3.933284379525868 3.716948779064364 -4.283056531993259 -0.7871445042110786 -2.717275448276679 -1.331979554120427 -2.00161987643283
2.704853232289311 5.096810047297704 -3.702503993191567 0.6575012461207962 5.46389102903014 -3.704137087293286 -3.903254809758635
1.601983953546306 -0.1203579252259406 -0.3062895190438526 0.175313020950767 -0.2927242062805701 10.26061370357527 8.663397624709534
2.542763835108369 1.999402730602079 -2.744969391278954 3.408241713097977 0.5833203500417369 -0.3169612388003896 -0.6668487209772357
4.4479318465969 1.691895135126161 -3.911429945561527 -0.1813757814393319 -0.3208077695176034 -0.3435334488009702 1.047910019569555
0.1994137627254837 -0.02124863562900203 -0.02453139551828756 -0.2455814306047584 0.5809845108412988 8.863315871612189 8.568366444761057
-0.00546656461008314 0.9612230062406658 -1.027780597044454 0.7880670070784757 3.997308062105357 6.543323157082853 4.38813389349057
-1.109715434930283 -2.112879026109977 -1.176816655497238 0.8659281865896576 4.664024700168246 4.223017487345678 3.059042127481491
-3.27326069524842 5.918204647750425 -3.595307363237362 3.612354956753099 1.769363355691085 4.58567195217772 3.190263512089556
2.312288464587377 -1.55330755810255 -3.376770239289236 0.2385599726018877 -0.05951473117153142 -1.57758514039278 -1.974610751035232

En la **Figura 36**. Se muestran los resultados predichos por el modelo luego de la división y validación en formato txt.

Figura 36

Proceso de Validación-Predicción (30 y 70%), Parte C



```

0.000000,0.000000,0.000000,-0.270547,-0.090165,-0.077691,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,1.000000,0.000000,6.506330,-0.090858,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,0.000000,0.000000,-0.422371,-0.089879,-0.077367,Mantto Menor  Mantto Menor
2.000000,2.000000,0.000000,1.164881,0.505326,-0.078477,Mantto Mayor  Mantto Menor
3.000000,0.000000,1.000000,0.350552,-0.090701,-0.078299,Mantto Menor  Mantto Menor
2.000000,1.000000,0.000000,-0.422371,-0.088608,-0.075927,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,0.000000,1.000000,-0.422371,-0.090201,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
0.000000,3.000000,0.000000,-0.422371,-0.087642,-0.074832,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,0.000000,2.000000,-0.422371,-0.088887,-0.076244,Mantto Menor  Mantto Menor
0.000000,0.000000,0.000000,0.585189,-0.090718,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
3.000000,2.000000,0.000000,-0.284349,-0.090423,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
0.000000,0.000000,0.000000,0.543783,-0.090858,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,0.000000,2.000000,-0.284349,-0.090534,-0.078109,Mantto Menor  Mantto Menor
0.000000,0.000000,3.000000,-0.380964,-0.090557,-0.078135,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,1.000000,0.000000,-0.422371,-0.090772,-0.078379,Mantto Menor  Mantto Menor
0.000000,1.000000,0.000000,-0.104920,-0.090858,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
2.000000,4.000000,0.000000,-0.422371,-0.089823,-0.077304,Mantto Menor  Mantto Menor
2.000000,0.000000,0.000000,0.474772,-0.032194,-0.012009,Mantto Menor  Mantto Menor
3.000000,2.000000,4.000000,-0.394766,-0.087378,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,0.000000,4.000000,0.681805,-0.021765,-0.000194,Mantto Menor  Mantto Menor
1.000000,5.000000,0.000000,-0.422371,-0.090857,-0.078477,Mantto Menor  Mantto Menor

```

4.3 Proceso de codificación, simulación final de escenarios para el grupo constructivo 200

Teniendo en cuenta actividades de mantenimiento recomendadas en el FMECA elaborado anteriormente para evitar la ocurrencia de fallas recurrentes, mantenimientos ejecutados en el Arc Caldas durante el periodo analizado, se asumen valores de TTR y Costos diferentes a los reales y tomando como datos de entrenamiento la división aleatoria del 70% de los datos reales y como datos de validación los valores asumidos codificados, se procede con simulación y predicción final de los escenarios mediante TransData/DeepNetworkTest (simulación, validación y predicción final)

Para el Proceso de codificación de datos de los escenarios asumidos, es necesario que en la carpeta Transdata se cree un archivo .txt con la información de rutas y archivos requeridos para la codificación, cuyo nombre es “encoding” y una carpeta con toda la información

“CODIFICACION7COLUM200”, se crea una subcarpeta denominada inputs, que contenga dos archivos txt, el primero contiene la información del tipo de codificación “codi_datos2007column_Escenario” y el segundo el archivo con los datos asumidos en el escenario, en formato delimitado por comas “Metadata200_ESCENARIOS11NOV_PREDICCION FINAL_CONCLUSION TRABAJO”, Ver **Figura 37.**

Figura 37

Codificación de escenarios. Archivo .txt de las rutas de acceso para codificación, tipo de datos y valores asumidos de Costos y TTR para el escenario

The image shows a code editor with three files open:

- codec_salida_Escenario.txt**: Contains a list of files to be processed, including 'Metadata200_ESCENARIOS11NOV.csv', 'codi_datos2007column.txt', and 'salida_Escenario.txt'.
- encoding.txt**: Contains a list of labels and encoders for data processing, such as '1;LabelEncoder;1', '3;LabelEncoder;2', etc.
- codi_datos2007column_Escenario.txt**: Contains a table of data for various equipment and activities, including columns for 'Unidad', 'GC', 'Sistema / Equipo', 'Clase Manten', 'TTR_Escenario', 'Costos Escen', 'Costos Epic', and 'Tipo Reemplazamiento'.

Unidad	GC	Sistema / Equipo	Clase Manten	TTR_Escenario	Costos Escen	Costos Epic	Tipo Reemplazamiento
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Inspección	1	20000	33858.04	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Inspección	1	20000	33858.04	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Actividad Man	1	20000	33852.54	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Actividad Man	1	20000	33852.54	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Inspección	1	20000	33852.54	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES	1	25000	34248	Manito Menor
ARC CALDAS	200	MOTOR PROPULSOR	ACTIVIDADES	100	25000	29583.22	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES	5	30000	59096	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES	20	30000	0	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Cogente de soporte	ACTIVIDADES	20	35000	61637.8	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES	4	35000	59096	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	ACTIVIDADES	2	45000	532489.76	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	ACTIVIDADES	2	45000	532489.76	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Cogente de soporte	Actividad Man	3	50000	55395.97	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES	2	55000	37972.8	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Inspección	2	60000	33858.04	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	Inspección	2	60000	33858.04	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	ACTIVIDADES	2	60000	0	Manito Menor
ARC CALDAS	200	MOTOR PROPULSOR	ACTIVIDADES	20	75000	68486	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	ACTIVIDADES	1	79000	849566.26	Manito Menor
ARC CALDAS	200	ENGRANAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES	15	80000	68486	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	ACTIVIDADES	2	80000	1183332.8	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Cogente de soporte	ACTIVIDADES	20	85000	136992	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	Actividad Man	2	90000	120022.62	Manito Menor
ARC CALDAS	200	Linea ejes	Actividad Man	2	90000	120022.62	Manito Menor

Luego de ingresar los datos correctos y utilizando el programa TransData, se crea automáticamente en la carpeta de “CODIFICACION7COLUM200”, una subcarpeta de resultados de codificación de escenario “**outputs**” con dos archivos (“**salida_Escenario**” y “**codec_salida_Escenario**”) el primer archivo muestra los resultados de la codificación de los valores asumidos en el escenario y el segundo archivo muestra las etiquetas de los datos del escenario, ver **Figura 38.**

Figura 38

Codificación de escenarios. Datos codificados y Etiquetas

```

codecsalida_Escenario.txt  encoding.txt
Archivo  Editar  Ver
MOTOR PROPULSOR 1
Cojinete de soporte 2
Linea ejes 3
Columna 3
Inspección 0
Actividad Mantto Menor 1
ACTIVIDADES MANTENIMIEN 2
DIQUE CARENA 3
Cambio componente 4
Mantenimiento Nivel 3 5
Mantenimiento Nivel 4 6

NormalizationEncoder Columna 4
norma = (val - mean) / (stdev);
mean=14.2994 stdev=40.2676
NormalizationEncoder Columna 6
norma = (val - mean) / (stdev);
mean=6.60403e+07 stdev=3.23796e+08
NormalizationEncoder Columna 7
norma = (val - mean) / (stdev);
mean=7.74637e+07 stdev=4.38989e+08
Ln 27, Col 26 | 609 caracteres. Texto sin formato

salida_Escenario.txt
Archivo  Editar  Ver
0;0;0;-0.330274;0;-0.203894;-0.176382
0;0;0;-0.330274;0;-0.203894;-0.176382
0;0;1;-0.330274;0;-0.203894;-0.176382
0;0;1;-0.330274;0;-0.203894;-0.176382
0;0;0;-0.330274;0;-0.203894;-0.176382
0;0;2;-0.330274;0;-0.203879;-0.176381
0;1;2;2.128277;0;-0.203879;-0.176392
0;0;2;-0.230939;0;-0.203864;-0.176325
0;0;2;0.141569;0;-0.203864;-0.176459
0;2;2;0.141569;0;-0.203848;-0.176319
0;0;2;-0.255773;0;-0.203848;-0.176325
0;3;2;-0.305441;0;-0.203817;-0.175246
0;3;2;-0.305441;0;-0.203817;-0.175246
0;2;1;-0.280607;0;-0.203802;-0.176333
0;0;2;-0.305441;0;-0.203786;-0.176374
0;0;0;-0.305441;0;-0.203771;-0.176382
0;0;0;-0.305441;0;-0.203771;-0.176382
0;3;2;-0.305441;0;-0.203746;-0.176459
0;1;2;0.141569;0;-0.203725;-0.176303
0;3;2;-0.330274;0;-0.203715;-0.174303
0;0;2;0.017400;0;-0.203709;-0.176303
0;3;2;-0.305441;0;-0.203709;-0.173764
  
```

Para el proceso de simulación/predicción de escenarios, en la carpeta **Transdata** es el siguiente, se crea archivo **.txt** con la información de rutas y archivos requeridos para la simulación/predicción de escenarios, cuyo nombre es "**DeepNetwork**" y una carpeta con toda la información denominada "**DeepNetwork**", se crea una subcarpeta nombrada "**inputs**", que contenga tres archivos txt, el primero es contiene la información del tipo de codificación "**att**" y el segundo el archivo son los datos asumidos en el escenario codificados "**salida_Escenario**" y el tercero contiene el 70% de datos aleatorios originales "**salida_Metadata200_70.txt**", ver

Figura 39.

Figura 39

Simulación, predicción de escenario. Archivo txt contiene carpetas archivos de donde se extrae información para la predicción

Tabla 16

Simulación, predicción del escenario. Resultados del modelo

Excel spreadsheet showing simulation results for 'result_modelEscenario.txt'. The table contains a single column of numerical data representing simulation results.

El valor predicho normalizado de costos/TTR se convierte en número (moneda) utilizando la formula valor = ((norma*stdev) + mean) y se comparara con los valores reales. En la anterior formula, norma es el valor predicho, normalizado y codificado, stdev es la desviación estándar, mean es el valor medio de los datos y el valor es el costo o TTR desnormalizado, ver Tabla 17.

Tabla 17

Costos normalizados predichos del escenario

Excel spreadsheet showing predicted normalized costs for 'result_predictEscenario.txt'. The table contains a single column of numerical data representing predicted normalized costs.

En la **Tabla 18**. Se muestran los resultados de los costos predichos para el escenario planteado, en el cual se asumen valores de TTR y Costos diferentes a los reales, donde luego del análisis mediante redes neuronales se evidencia un valor promedio de costos alrededor de los 22 millones. Aunque la metodología mixta de análisis, acompañada de las redes neuronales fueron aplicadas correctamente, este resultado es debido a que los datos con que se contaba para este tipo de análisis avanzados no eran los más correctos, ya que no contenían el detalle específico requerido, organización entre otros factores que no fueron recolectados por la organización como la disponibilidad de recursos humanos, repuestos, turnos etc.

Tabla 18

Resultados de la predicción de costos del escenario desnormalizados

Unidad	GC	Sistema / Equipo	Clase de mantenimiento	TTR	Escenario	Costos escenario (\$)	Costos específicos (\$)	Tipo de requerimiento	Costo predicho (\$)
ARC CALDAS	200	ENGRAJE REDUCTOR	Inspección	1	1	20000	33858,04	Manto. Menor	22.523.751,07
ARC CALDAS	200	ENGRAJE REDUCTOR	Inspección	1	1	20000	33858,04	Manto. Menor	22.523.751,07
ARC CALDAS	200	ENGRAJE REDUCTOR	Actividad Manto. Menor	1	1	20000	33858,24	Manto. Menor	22.523.751,07
ARC CALDAS	200	ENGRAJE REDUCTOR	Actividad Manto. Menor	1	1	20000	33858,24	Manto. Menor	22.523.751,07
ARC CALDAS	200	MOTOR PROPULSOR	ACTIVIDADES MANTENIM.	1	1	20000	34246	Manto. Menor	22.523.751,82
ARC CALDAS	200	MOTOR PROPULSOR	ACTIVIDADES MANTENIM.	100	1	35000	29583,32	Manto. Menor	22.523.750,70
ARC CALDAS	200	ENGRAJE REDUCTOR	ACTIVIDADES MANTENIM.	5	1	50000	59096,06	Manto. Menor	22.523.750,70

5.0 Análisis De Resultados - Análisis Inferencial De Datos (Julius)

5.1 Introducción

El análisis inferencial tiene como propósito establecer relaciones y diferencias estadísticamente significativas entre las variables observadas, a partir de los datos recolectados. En este caso, se buscó determinar si el tipo de requerimiento, la clase de mantenimiento (CLASE), el grupo constructivo (GC) y el costo planificado influyen en las variables dependientes

tiempo total de reparación (TTR) y costo ejecutado. Este tipo de análisis permite generalizar los resultados a la población de operaciones de mantenimiento, más allá de la muestra utilizada ($n \approx 12.400$ registros), garantizando una potencia estadística alta para las pruebas aplicadas.

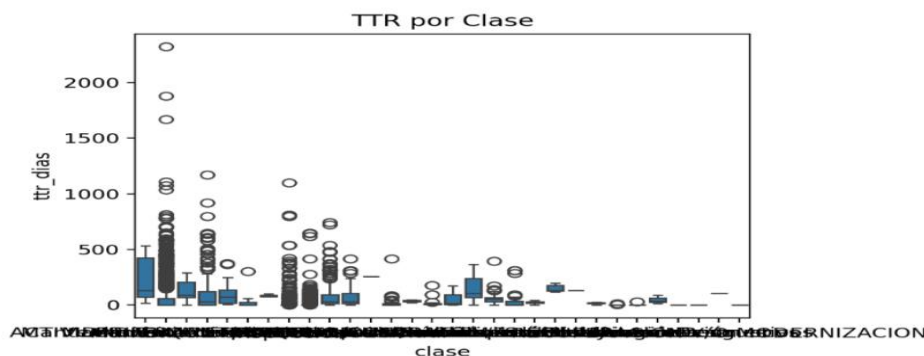
5.2 Exploración inicial de los datos

El análisis descriptivo previo mostró que tanto TTR como los costos ejecutados presentan distribuciones sesgadas a la derecha, con valores atípicos elevados que distorsionan la media. En consecuencia, la mediana se considera un mejor indicador de tendencia central. La alta variabilidad en los costos sugiere la conveniencia de aplicar transformaciones logarítmicas o el uso de errores robustos en los modelos lineales, con el fin de mitigar el efecto de los valores extremos.

En la **Figura 40**. Se observa grafico de caja y bigotes en el cual se evidencia la distribución del TTR para cada clase mantenimiento, donde en general se muestran valores altos de TTR, medianas bajas, valores atípicos altos sesgados hacia la derecha y una alta dispersión. Adicionalmente el TTR y la Clase de mantenimiento están asociados significativamente.

Figura 40

BoxPlot, TTR por clase de Mantenimiento



5.3 Análisis de varianza (ANOVA)

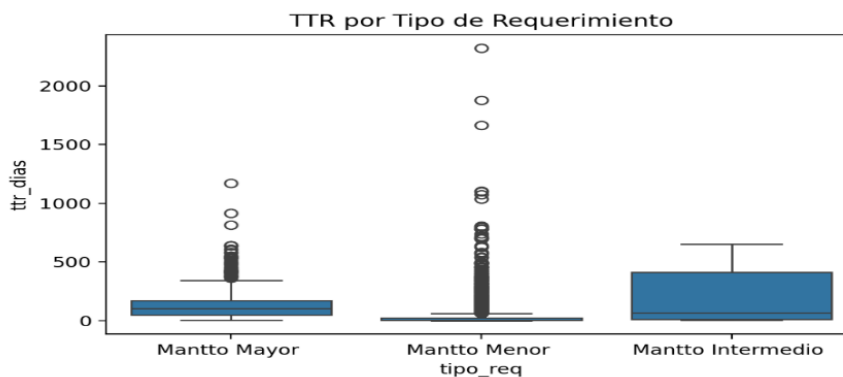
Se aplicó un ANOVA de un factor para evaluar si existen diferencias significativas en el TTR y en los costos ejecutados entre los distintos tipos de requerimiento. Los resultados mostraron p-valores significativamente bajos ($p < 0,05$), lo que permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias. En consecuencia, se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas en el TTR y en los costos entre los tipos de requerimiento.

Este resultado implica que la probabilidad de que las diferencias observadas se deban al azar es menor al cinco por ciento. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se acepta la hipótesis alternativa, que plantea la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de requerimiento. En términos prácticos, esto confirma que el tipo de requerimiento influye de manera real y comprobable sobre los tiempos de reparación (TTR) y los costos ejecutados, más allá de la variación aleatoria inherente a los datos.

En la **Figura 41**. Se muestra la distribución de TTR por el tipo de requerimiento, donde el Mnto intermedio presenta los valores de TTR más altos, el mantenimiento menor una menor mediana y tanto Mnto mayor como Mnto menor presentan una alta dispersión de datos.

Figura 41

BoxPlot del TTR por tipo de Requerimiento



5.4 Modelo de regresión lineal (OLS)

Con el fin de analizar el efecto conjunto de las variables explicativas, se ajustó un modelo de regresión lineal ordinaria (OLS), considerando como variables independientes la clase de mantenimiento, el grupo constructivo (GC) y el costo planificado, y como variable dependiente el TTR. El modelo arrojó un coeficiente de determinación (R^2) bajo, lo cual indica que, aunque algunas de las variables analizadas son significativas, explican solo una parte de la variabilidad total del TTR. Esto sugiere la existencia de otros factores operativos no incluidos en el modelo, como la disponibilidad de recursos, condiciones técnicas o imprevistos en ejecución. Aun así, los resultados confirman que la clase de mantenimiento tiene un efecto significativo sobre el TTR, el grupo constructivo (GC) y el costo planificado aportan información adicional, pero con un peso estadístico menor, y la señal del tipo de requerimiento persiste incluso controlando por GC y costo plan, lo que refuerza su relevancia operativa.

En la **Tabla 19**. Se observa el modelo de regresión lineal del TTR mostrando como resultado un R^2 de 0,063 lo que significa que solo el 6% de la variabilidad la explica el modelo.

Tabla 19

OLS de TTR, Clase de Mnto, GC, Costo planeado

Parámetro / Variable	Coefficiente	Error estándar	Valor t	p	Intervalo de confianza al 95%
Características del modelo					
Variable dependiente	ttr_días	—	—	—	—
Tipo de modelo	OLS	—	—	—	—
Método de estimación	Mínimos cuadrados	—	—	—	—
R ²	0,063	—	—	—	—
R ² ajustado	0,06	—	—	—	—
Estadístico F	26,66	—	—	< 0,001	—
N.º de observaciones	12419	—	—	—	—
GI del modelo / GI de residuos	31 / 12387	—	—	—	—
Tipo de matriz de covarianza	No robusta	—	—	—	—
Log-verosimilitud	-71979,00	—	—	—	—
Criterio de información de Akaike (AIC)	1,44E+05	—	—	—	—
Criterio de información bayesiano (BIC)	1,44E+05	—	—	—	—

En la **Tabla 20**. Se observa el modelo de regresión lineal de los costos ejecutados mostrando como resultado un R^2 de 0,626 lo que significa el 62% de la variabilidad lo explica el modelo.

Tabla 20

OLS de los Costos ejecutados, Tipo de requerimiento, GC, Costos planeados

Variable / Estadístico	Valor / Coeficiente	Error estándar	Valor t	P	Intervalo de confianza al 95%
Modelo y ajuste					
Tipo de modelo	OLS	—	—	—	—
Método de estimación	Mínimos cuadrados	—	—	—	—
R^2	0,626	—	—	—	—
R^2 ajustado	0,626	—	—	—	—
Estadístico F	5201,01	—	—	< 0,001	—
Probabilidad (F)	0	—	—	—	—
N.º de observaciones	12419	—	—	—	—
Grados de libertad (modelo)	4	—	—	—	—
Grados de libertad (residuos)	12414	—	—	—	—
Tipo de covarianza	No robusta	—	—	—	—
Log-verosimilitud	-2,3941e+05	—	—	—	—
AIC	4,79E+05	—	—	—	—
BIC	4,79E+05	—	—	—	—

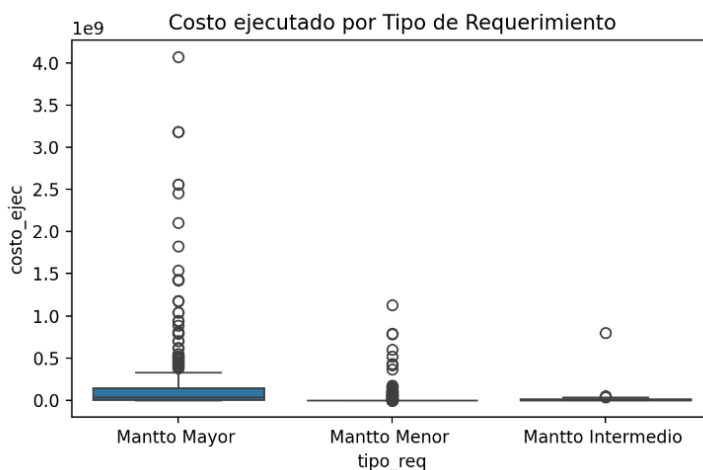
5.5 Análisis de costos ejecutados

En el caso del costo ejecutado, el modelo OLS obtuvo un R^2 considerablemente más alto, evidenciando que el costo planificado explica buena parte de la variación observada, mientras que el tipo de requerimiento agrega una señal estadísticamente significativa adicional. El ANOVA complementario corroboró diferencias en las medias de costo entre tipos de requerimiento, y el análisis de Tukey permitió identificar grupos homogéneos de tipos con costos similares. Estos resultados son útiles para establecer políticas de presupuestación diferenciadas por tipo de requerimiento, permitiendo ajustar los costos planificados con base en la experiencia empírica.

En la **Figura 42**. Se muestra grafico de caja y bigotes de los costos por el tipo de requerimiento, en este se evidencia que el mayor porcentaje de los costos ejecutados corresponde al Mnto Mayor, el cual presenta la mayor mediana y dispersión de datos.

Figura 42

BoxPlot de Costos ejecutados por tipo de Requerimiento



5.6 Interpretación técnica

Los hallazgos estadísticos se alinean con la lógica operacional de las actividades de mantenimiento: los mantenimientos mayores implican mayor alcance técnico, mayor tiempo de parada, intervención simultánea de sistemas y necesidad de repuestos críticos, lo cual incrementa tanto el TTR como el costo. Los mantenimientos intermedios y menores son de menor complejidad técnica, con menos incertidumbre y menores requerimientos logísticos. Las diferencias entre costo plan y costo real (overrun) se asocian con cambios de alcance, incertidumbre técnica y variaciones de precios o disponibilidad de materiales. Factores como la carga de trabajo en los talleres, la disponibilidad de recursos especializados y la logística de repuestos explican parte de la variación no capturada por el modelo.

5.7 Conclusiones del Análisis Inferencial

El análisis inferencial permite afirmar con respaldo estadístico que: el tipo de requerimiento influye significativamente en los tiempos y costos de ejecución; la clase de mantenimiento y el grupo constructivo tienen efectos adicionales, aunque más moderados; el costo planificado es un predictor fuerte del costo ejecutado, pero no explica por sí solo la variabilidad total observada; los resultados sugieren que factores técnicos y logísticos no modelados contribuyen de forma relevante a las diferencias encontradas. En consecuencia, se recomienda incorporar estos hallazgos en la planificación de presupuestos, asignación de recursos y control de desempeño operativo, asegurando que las políticas internas reflejen las diferencias empíricamente demostradas entre tipos de requerimiento y clases de mantenimiento.

6. Conclusiones Finales

El desarrollo del presente trabajo permitió diseñar, estructurar e implementar una metodología mixta de análisis (AQQC) orientada a la optimización de los costos de mantenimiento y del Tiempo de Reparación (TTR) en la fragata ARC Caldas. El proceso investigativo y aplicado permitió avanzar de manera rigurosa en los tres objetivos propuestos, generando resultados significativos tanto a nivel técnico como metodológico.

En primer lugar, la consolidación de la base de datos histórica de cinco años constituyó un hito importante para el diagnóstico inicial, ya que permitió identificar sistemas críticos, tendencias de fallas y magnitudes representativas de costos y TTR. Aunque se evidenciaron debilidades en la calidad y completitud de los registros, el análisis ejecutado permitió comprender el comportamiento general del mantenimiento, así como identificar brechas en la gestión de datos que afectan la toma de decisiones operacionales.

En segundo lugar, se diseñó y formuló satisfactoriamente la metodología mixta AQQC, integrada por herramientas reconocidas y ampliamente utilizadas en la gestión de activos: FMECA, RCA, Causa-Efecto y FTA. La articulación secuencial de estas técnicas permitió construir un marco analítico robusto para la identificación de fallas causales, la evaluación de modos de falla y el entendimiento estructural de los eventos que afectan la disponibilidad de los sistemas. Esta metodología constituye un aporte valioso para la institución, al ofrecer una estructura sólida, replicable y adaptable a diferentes niveles de complejidad técnica.

Finalmente, respecto al tercer objetivo, se desarrolló e implementó un modelo de simulación y predicción basado en redes neuronales para evaluar el impacto potencial de la metodología en los costos de mantenimiento y el TTR. El proceso de validación, entrenamiento y creación de escenarios permitió analizar el comportamiento proyectado ante variaciones en

parámetros críticos. Aunque no fue posible alcanzar una optimización concluyente de costos y TTR, esto no obedece a fallas en el desarrollo metodológico, sino a limitaciones inherentes a la calidad de los datos disponibles. La base de datos histórica presentó inconsistencias, vacíos y falta de especificidad, factores que afectan directamente el rendimiento de los modelos predictivos y la capacidad del sistema para generar resultados óptimos.

A pesar de ello, el desarrollo metodológico demostró ser adecuado, pertinente y técnicamente sólido. Los modelos ejecutados respondieron correctamente a su configuración y validación interna, evidenciando que la metodología AQQC y las técnicas de inteligencia artificial aplicadas tienen un alto potencial para la optimización del mantenimiento, siempre que se cuente con datos completos, reales, organizados, consistentes y depurados.

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten concluir que:

- La metodología propuesta es funcional y aplicable a la gestión del mantenimiento de la fragata ARC CALDAS y puede extrapolarse a cualquier sector industrial que disponga de información confiable.
- Las técnicas integradas en el enfoque AQQC ofrecen una visión sistémica de las fallas, fortaleciendo la capacidad de análisis y de toma de decisiones estratégicas en mantenimiento.
- La ausencia de optimización cuantitativa final no invalida el objetivo; por el contrario, evidencia la necesidad institucional de mejorar la gestión de datos, lo cual es un requisito fundamental para la implementación de metodologías avanzadas de pronóstico y optimización.
- La aplicación de modelos neuronales demostró ser una herramienta prometedora para el análisis predictivo, cuyo desempeño podría incrementarse significativamente con bases de datos más completas y estructuradas.

- El trabajo desarrollado constituye una guía metodológica clara y replicable, que se proyecta como un aporte relevante para la mejora continua en procesos de mantenimiento naval y en industrias con sistemas complejos.

En conjunto, este trabajo demuestra que la metodología mixta AQQC es una herramienta poderosa para la toma de decisiones en mantenimiento y que su verdadero potencial se manifestará plenamente cuando se disponga de datos adecuados y de una cultura organizacional orientada al registro confiable y sistemático de la información. De esta manera, la investigación sienta bases sólidas para futuras implementaciones que podrán generar impactos significativos en costos, disponibilidad y tiempos de reparación, tanto en el ámbito naval como en cualquier organización con activos de misión crítica.

Referencias

1. Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.
2. Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2010). *The SAGE handbook of mixed methods in social & behavioral research* (2nd ed.). SAGE Publications.
3. Plano Clark, V. L., & Ivankova, N. G. (2016). *Mixed methods research: A guide to the field*. SAGE Publications.
4. Greene, J. C. (2007). *Mixed methods in social inquiry*. Jossey-Bass.
5. Johnson, R. B., & Christensen, L. (2019). *Educational research: Quantitative, qualitative, and mixed approaches* (7th ed.). SAGE Publications.
6. Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
7. Morse, J. M., & Niehaus, L. (2009). *Mixed method design: Principles and procedures*. Routledge.
8. Fetters, M. D., Curry, L. A., & Creswell, J. W. (2013). Achieving integration in mixed methods designs: Principles and practices. *Health Services Research, 48*(6), 2134–2156. <https://doi.org/10.1111/1475-6773.12117>
9. Cameron, R., & Molina-Azorín, J. F. (2011). The application of mixed methods in organisational research: A literature review. *Electronic Journal of Business Research Methods, 9*(2), 95–105.
10. Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
11. Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

12. Harrington, R. L. (1992). *Marine engineering*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
13. Taylor, D. A. (1996). *Introduction to marine engineering* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
14. McGeorge, H. D. (1995). *Marine auxiliary machinery* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
15. Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic ship theory* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
16. Eyres, D. J., & Bruce, G. J. (2012). *Ship construction* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
17. Lamb, T. (Ed.). (2003). *Ship design and construction* (Vols. 1–2). Society of Naval Architects and Marine Engineers.
18. Molland, A. F. (2008). *The maritime engineering reference book: A guide to ship design, construction and operation*. Butterworth-Heinemann.
19. Watson, D. G. M. (1998). *Practical ship design*. Elsevier.
20. Schneekluth, H., & Bertram, V. (1998). *Ship design for efficiency and economy* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
21. Vorobioff, J., Cerotta, S., Eneas, M., & Amadio, A. (2022). *Inteligencia artificial y redes neuronales*. Editorial Universidad Tecnológica Nacional.
22. Breiman, L. (2001). Statistical modeling: The two cultures. *Statistical Science*, 16(3), 199–231.
23. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2017). *The business of artificial intelligence*. Harvard Business Review Press.
24. Management Solutions. (2018). *Machine learning: Una pieza clave en la transformación de los modelos de negocio*. Management Solutions.

25. Management Solutions. (2020). *Auto machine learning: Hacia la automatización de los modelos*. Management Solutions.
26. Sánchez, G. (2006). *Fundamentos del análisis de fallas*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
27. Raschka, S., Liu, Y., & Mirjalili, V. (2023). *Machine learning con PyTorch y Scikit-Learn: Desarrollo de modelos machine learning y deep learning con Python*. Packt Publishing.
28. Greene, J. C., Caracelli, V. J., & Graham, W. F. (2016). *Doing mixed methods research*. SAGE Publications.
29. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
30. Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
31. Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
32. Aggarwal, C. C. (2018). *Neural networks and deep learning: A textbook*. Springer.
33. Rashid, T. (2016). *Make your own neural network*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
34. Haykin, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive foundation* (2nd ed.). Prentice Hall.
35. Géron, A. (2019). *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow* (2nd ed.). O'Reilly Media.
36. Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (Eds.). (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition*. MIT Press.
37. Ballard, D. H. (1982). *Perception: A model for computer processing of images*. Prentice Hall.
38. Schalkoff, R. (1997). *Artificial neural networks*. McGraw-Hill.

39. MTU Friedrichshafen GmbH. (2011). *Operating instructions: MTU Series 1163 marine diesel engine*. MTU Solutions.

Apéndices

Apéndice A. Situación actual del mantenimiento aplicado a la fragata ARC Caldas

Según la **Figura 2**. El Costo Facturado fue de: 23'853.090.693, correspondiente al 15% del valor total facturado TTR: 168.971, correspondiente a un valor más alto, de más de 40%, de las otras fragatas y que es el 18% de total de todas las unidades.

Como se puede observar en el **Tabla A1**. La unidad ARC Caldas es la segunda unidad con mayor cantidad de equipos y avisos de mantenimiento lo que equivale al 4,68% del total de 545 embarcaciones.

Tabla A1

Numero de requerimientos de mantenimiento por fragatas

Unidad	Equipo	Aviso	Pct. AVA (%)
ARC ANTIOQUIA	147	293	6,53
ARC CALDAS	102	210	4,68
ARC VICTORIA	80	189	4,21
ARC INDEPENDIENTE	98	157	3,5
ARC TAYRONA	78	138	3,07
Total	1775	4488	100

Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

En el **Tabla A2**. Se evidencia que los sistemas con más avisos son grupos de ventilación, planta de aire acondicionado, equipo de radio, sistema de refrigeración de la carga, equipos de cocina, lavandería, motores propulsores.

Tabla A2

Numero de requerimientos de mantenimiento por sistemas

Sistema y equipo	Aviso	Pct. SEA (%)
PLANTA DE ACONDICIONAMIENTO	17	8,1
EQUIPO DE REFRIGIO	14	6,19
SISTEMA DE DESCARGA DE LA CARGA	14	6,19
EQUIPO DE LAVANDERÍA	11	4,76
MOTORES PROPULSORES	9	4,29
PLANTA DESALINIZADORA	9	4,29
MOTORES GENERADORES	9	3,81
Grupo Ventiladores/extractores U y L	5	2,38
Bombas del Sist. de agua salada máq.	3	1,43
Sist. automáticos de control	3	1,43
ANTENAS DE COMUNICACIONES	2	0,95
Total	210	100

Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

En el **Tabla A3**. Se evidencia que los modos y mecanismos de falla predominantes en la unidad ARC Caldas, información que sera de vital importancia en la consecución del objetivo de este trabajo que es optimizar costos y TTR.

Tabla A3

Modos y mecanismos de fallas ARC Caldas

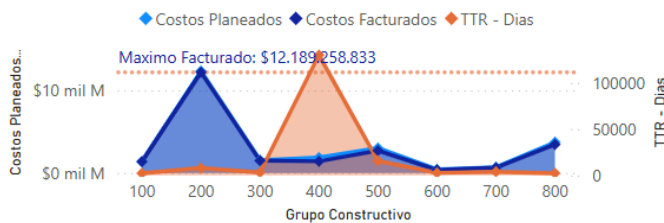
Modo de falla	Avisos	Pct. AMF (%)	Mecanismo de falla	Aviso	Pct. MCFA (%)
Problemas menores en el servicio	38	18,1	Fatiga	66	31,43
No arranca al momento de encender	26	12,38	Corrosión	14	6,67
Ruido	21	10	Ruptura	12	6,62
Lectura anormal del instrumento	16	7,62	Desgaste	13	6,19
No responde al mando	13	6,19	Falla del software	10	5,71
Cortocircuito	9	4,29	Total	210	100
Total	210	100			

Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

En el **Figura A1**. Se puede observar dos datos críticos el mayor costo facturado lo tiene el grupo constructivo 200 correspondiente al sistema de planta propulsora (12'189.258.833) y el máximo valor de TTR lo tiene el grupo constructivo 400 correspondiente al sistema de mando y exploración (129.915 días).

Figura A1

Costos planeados, costos facturados y TTR por grupo constructivo



Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

En el **Tabla A4**. Se puede observar que el 97% de requerimientos de mantenimientos se debe a mantenimiento menor, con un costo real de 1'938.706. 480.

Tabla A4

% de Costos por requerimientos de mantenimiento

Tipo de mantenimiento	Valor económico	Porcentaje respecto al total general (%)
Mantenimiento Intermedio	\$ 197.991.336	0,85
Mantenimiento Mayor	\$ 21.446.392.877	2,11
Mantenimiento Menor	\$ 1.938.706.480	97,04

Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

En el **Tabla A5**. Se puede observar que las fallas más recurrentes en el sistema de propulsión están asociadas con la bomba del sistema de combustible, sellos del sistema de enfriamiento y la unidad de arranque de los motores propulsores.

Tabla A5

Fallas recurrentes del sistema de propulsión

Parte Objeto	Aviso	Pct_POA
Bomba de combustible	2	20,00%
Sellos	2	20,00%
Unidad de Arranque	2	20,00%
Unidad de Control y Monitoreo	2	20,00%
Filtro separador de agua	1	10,00%
Turbo alimentador	1	10,00%
Total	10	100,00%

Nota. Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

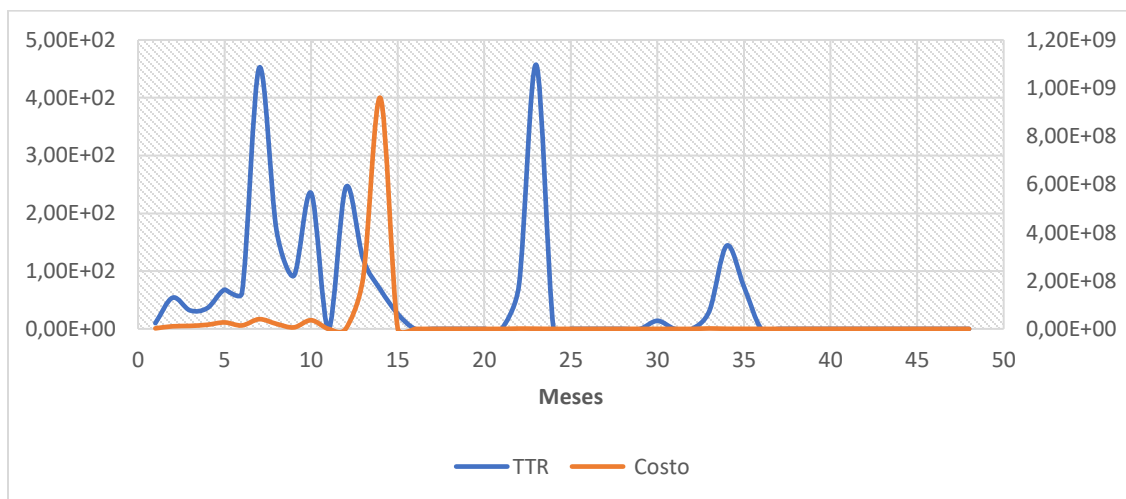
Apéndice B. Análisis de datos, correlación y regresión de sistemas críticos por grupo constructivo en la fragata ARC Caldas

Grupo 100 (Casco y Estructura)

En la **Figura B1**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que no existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque en las mismas frecuencias y/o acontecimientos no se observan picos definidos de TTR y de costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 7,14,23 y 34.

Figura B1

Grafica de TTR y costos - grupo 100: casco y estructura



En la **Tabla B1**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.08 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva débil. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla B1

Análisis de correlación entre el TTR, costos, Mnto mayor, menor e intermedio

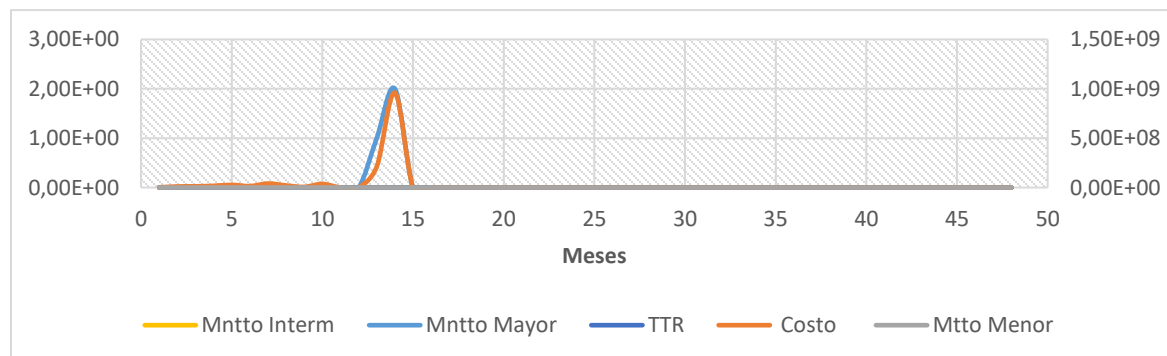
	TTR	Costo	Mtto Menor	Mtto Interno	Mtto Mayor
TTR	\$ 1,00	—	—	—	—
Costo	\$ 0,08	\$ 1,00	—	—	—
Mtto Menor	\$ 0,49	\$ 0,02	\$ 1,00	—	—
Mtto Interno	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	—	\$ 1,00	—
Mtto Mayor	\$ 0,07	\$ 0,97	-\$ 0,05	#¡DIV/0!	\$ 1,00

En la **Figura B2**. Se muestra en el eje izquierdo el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje derecho los Costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses porque en las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 10 y 14.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0.97 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura B2

Grafica de costos y Mnto mayor - grupo 100 : casco y estructura

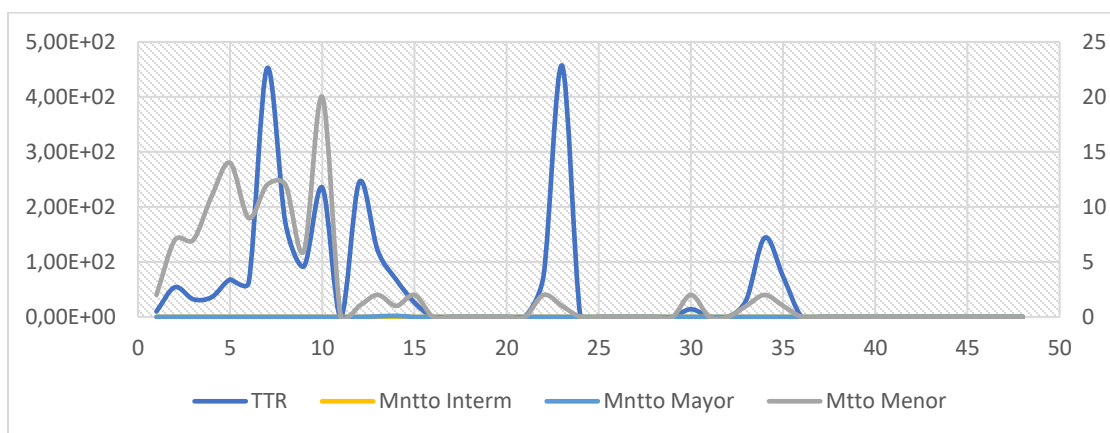


En la **Figura B3**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de mantenimiento menor y en el eje izquierdo el TTR. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento menor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses porque en las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Menor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 7,10 y 23.

Los resultados obtenidos muestran que el coeficiente de correlación es 0,49 entre las variables Mnto Menor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Menor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B3

Grafica de TTR y Mnto menor - grupo 100 : casco y estructura

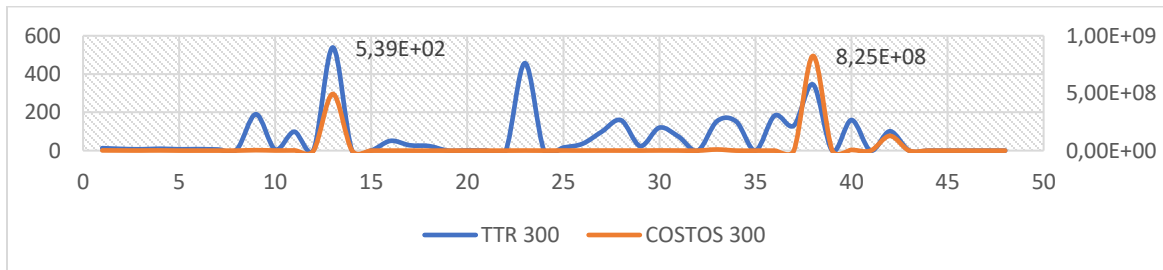


En la **Figura B4**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de TTR y costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 13,23 y 38.

Grupo 300

Figura B4

Grafica del TTR y costos - grupo 300 : planta eléctrica



En la **Tabla B2**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0.62 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla B2

Análisis de correlación - grupo 300

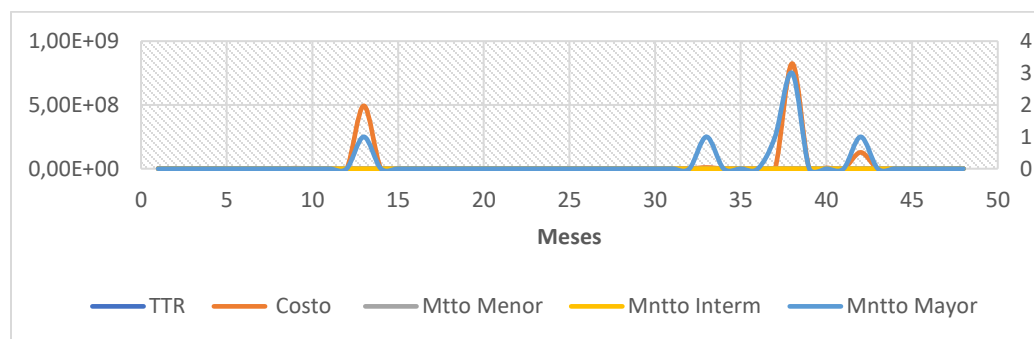
	TTR	Costo	Mtto Menor	Mtto Interno	Mtto Mayor
TTR	1	—	—	—	—
Costo	0,62	1	—	—	—
Mtto Menor	0,01	-0,17	1	—	—
Mtto Interno	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	—
Mtto Mayor	0,54	0,88	-0,16	#DIV/0!	1

En la **Figura B5**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo los Costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 13 y 38.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,88 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura B5

Grafica de costos y Mnto mayor - Grupo 300: planta eléctrica

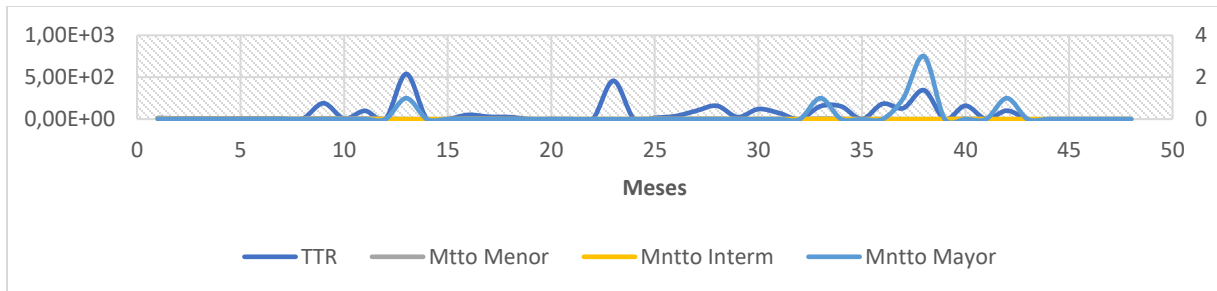


En la **Figura B6**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Mayor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y TTR son los meses 13 y 38.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,54 entre las variables Mnto Mayor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B6

Grafica de TTR y Mnto mayor - grupo 300: planta eléctrica

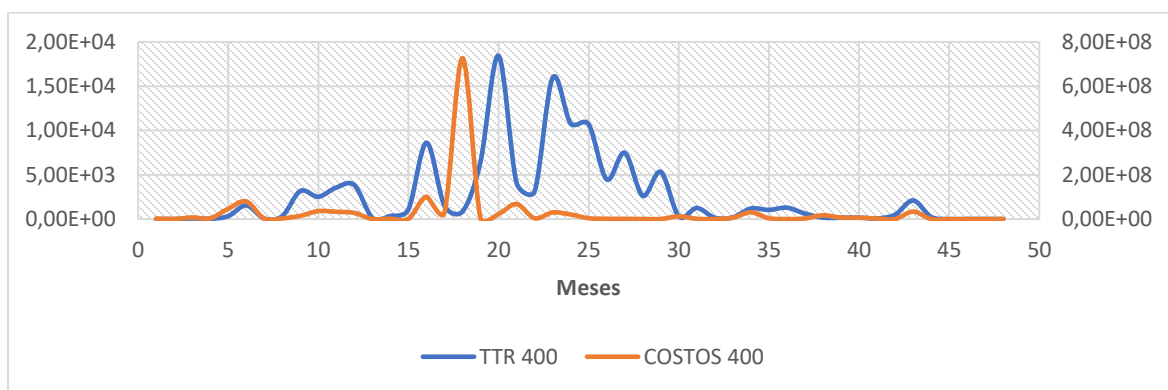


Grupo 400(Mando y Exploración)

En la **Figura B7**. Se muestra en el eje Izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que no existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos no se observan picos de TTR y costos definidos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 12,16,18 y 20.

Figura B7

Grafica de TTR y costos - grupo 400 : mando y exploración



En la **Tabla B3**. Se muestra que el coeficiente de correlación es -0,0013 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal negativa débil. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a disminuir.

Tabla B3

Análisis de correlación entre el TTR y costos - grupo 400

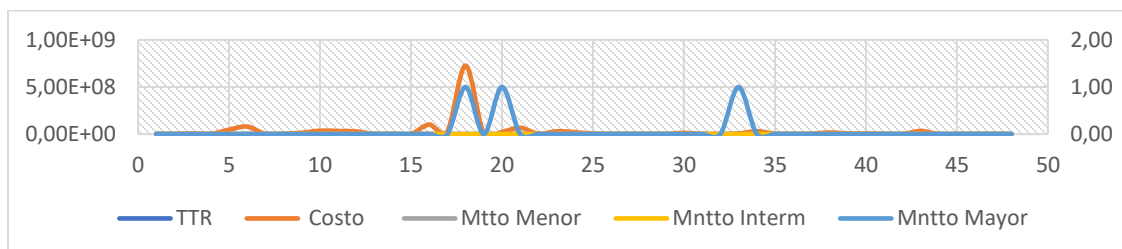
	TTR	Costo	Mtto Menor	Mtto Interno	Mtto Mayor
TTR	1	—	—	—	—
Costo	-0,0013	1	—	—	—
Mtto Menor	0,87	-0,00069	1	—	—
Mtto Interno	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	1	—
Mtto Mayor	0,24	0,55	0,18	#¡DIV/0!	1

En la **Figura B8**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo los Costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 18,20 y 33.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,55 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura B8

Grafica de costos y Mnto mayor - grupo 400 : mando y exploración

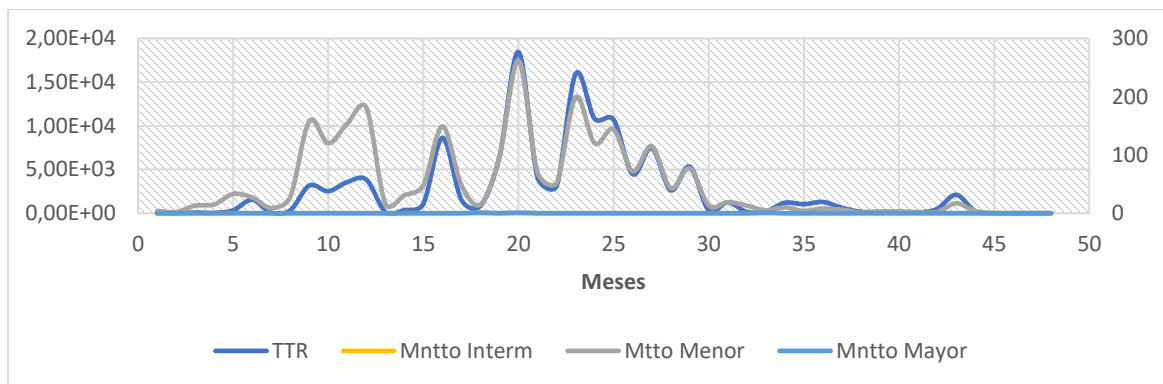


En la **Figura B9**, se muestra en el eje derecho el número de actividades de mantenimiento menor y en el eje izquierdo el TTR. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento menor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto menor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 16, 20 y 23.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,87 entre las variables Mnto Menor y TTR. Lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Menor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B9

Grafica de TTR, Mnto menor - grupo 400 : mando y exploración

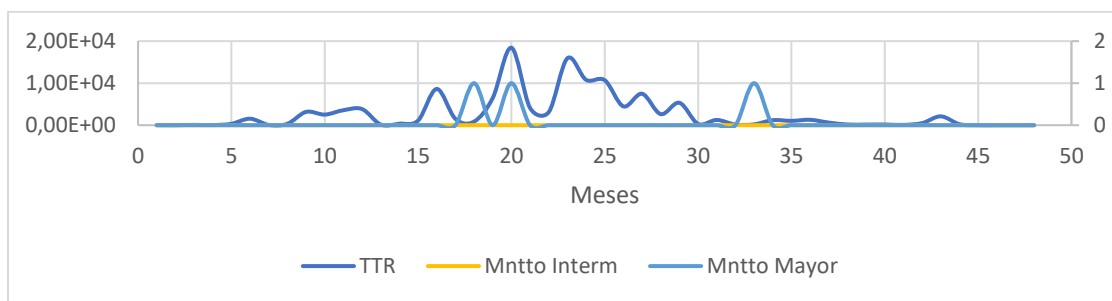


En la **Figura B10**, se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Mayor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y TTR son los meses 20 y 23.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,24 entre las variables Mnto Mayor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva débil. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B10

Grafica de TTR y Mnto mayor - Grupo 400 : mando y exploración

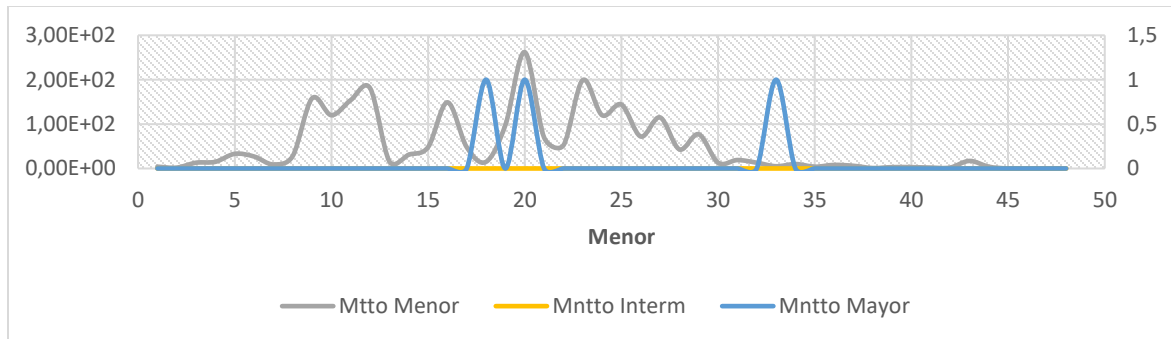


En la **Figura B11**. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el número de actividades de mantenimiento Mayor y el número de actividades de mantenimiento Menor a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor Y Mnto Menor. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y el mantenimiento menor, son los meses 18 y 20.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,18 entre las variables Mnto Menor y Mnto Mayor, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva débil. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el mantenimiento menor tendera a aumentar.

Figura B11

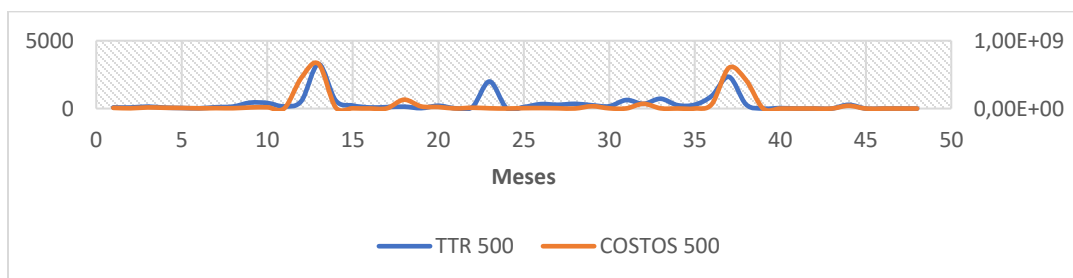
Grafica de Mnto mayor y menor - Grupo 400 : mando y exploración

**Grupo 500(Sistemas Auxiliares)**

En la **Figura B12**, se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de TTR y costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 13 y 37.

Figura B12

Grafica de TTR y costos - grupo 500 : sistemas auxiliares



En la **Tabla B4**, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,72 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla B4

Análisis de correlación entre el TTR, costos, Mnto mayor, menor e intermedio - grupo 500

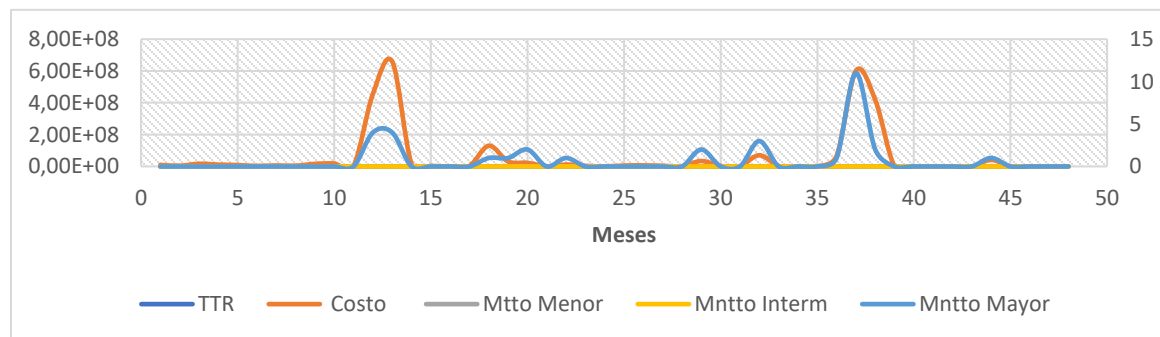
	TTR	Costo	Mtto Menor	Mtto Interno	Mtto Mayor
TTR	1	—	—	—	—
Costo	0,72	1	—	—	—
Mtto Menor	-0,11	-0,18	1	—	—
Mtto Interno	0,71	0,62	-0,08	1	—
Mtto Mayor	0,63	0,83	-0,22	0,4	1

En la **Figura B13**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo los Costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,83 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura B13

Grafica de Mnto mayor y costos - grupo 500 : sistemas auxiliares



En la **Figura B14**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento intermedio. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Intermedio y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Intermedio y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Intermedio y TTR son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,72 entre las variables Mnto Intermedio y TTR. Lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el mantenimiento intermedio aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B14

Grafica de TTR, Mnto intermedio - grupo 500 : sistemas auxiliares

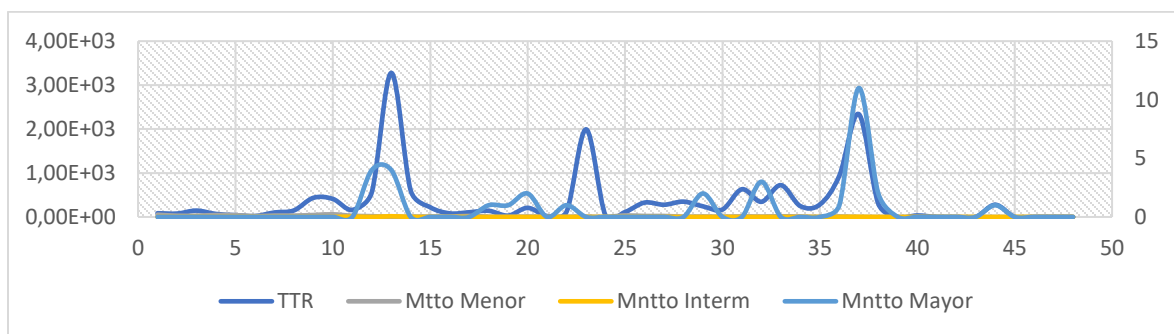


En la **Figura B15**. se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Mayor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y TTR son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,63 entre las variables Mnto Mayor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B15

Grafica de TTR y Mnto mayor - grupo 500 : sistemas auxiliares

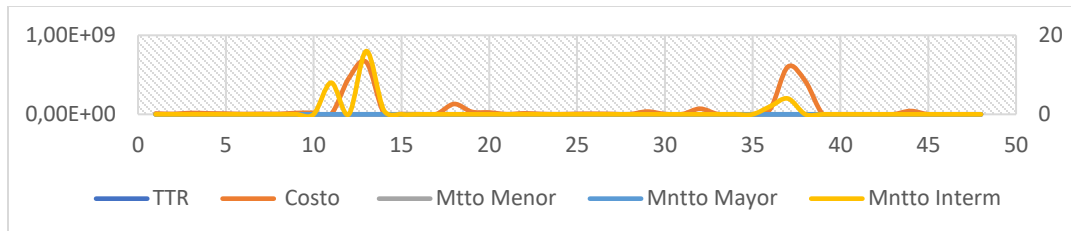


En la **Figura B16**, se muestra en el eje derecho el número de actividades de mantenimiento intermedio y en el eje izquierdo los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre las actividades de mantenimiento intermedio y los costos a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y /o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto intermedio y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento Intermedio y los costos, son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,62 entre las variables Mnto Intermedio y costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal Moderada. Esto significa que a medida que el Mant Intermedio aumenta, los Costos tenderán a aumentar.

Figura B16

Grafica de costos y Mnto intermedio - grupo 500 : sistemas auxiliares

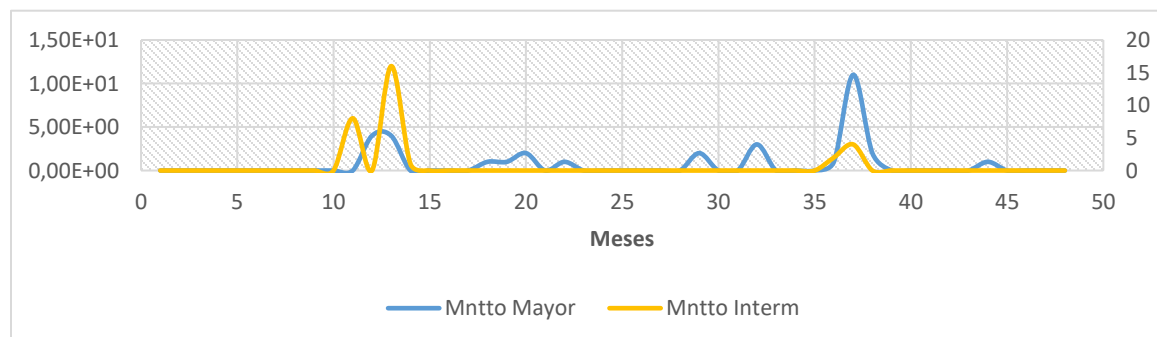


En la **Figura B17**. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el número de actividades de mantenimiento Mayor y el mantenimiento número de actividades de mantenimiento Intermedio a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y Mnto Intermedio. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y el mantenimiento Intermedio, son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0.40 entre las variables Mnto Intermedio y Mnto Mayor, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el mantenimiento menor tendera a aumentar.

Figura B17

Grafica Mnto mayor e intermedio - Grupo 500 : Sistemas Auxiliares

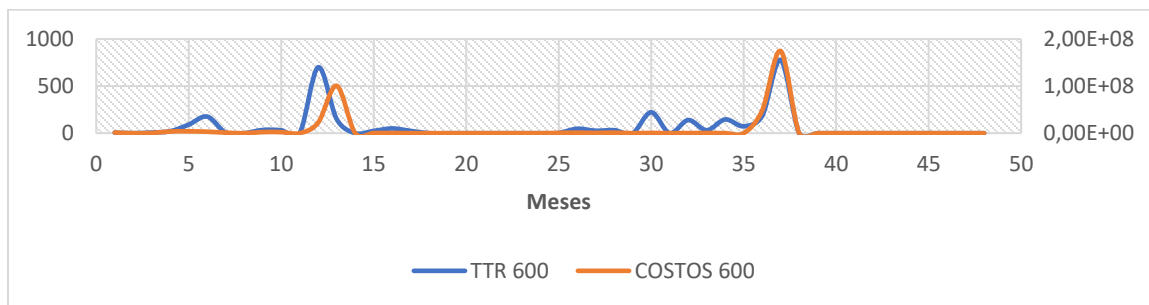


Grupo 600(Habitabilidad y Equipamiento general)

En la **Figura B18**. Se muestra en el eje Izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de TTR y costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 12, 13 y 37.

Figura B18

Grafica de TTR y costos - grupo 600 : habitabilidad y equipamiento general



En la **Tabla B5**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,72 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla B5

Análisis de correlación entre el TTR, costos, Mnto mayor, menor e intermedio - grupo 600

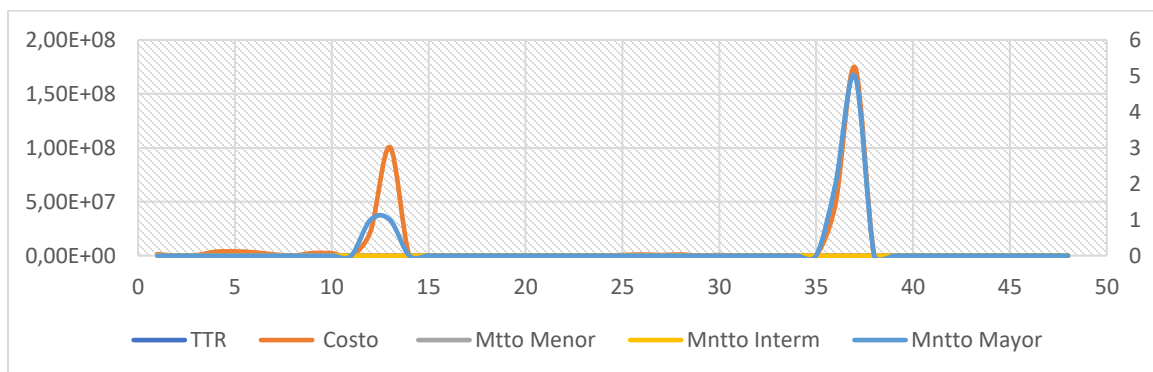
Variable	TTR	Costo	Mantenimiento Menor	Mantenimiento Intermedio	Mantenimiento Mayor
TTR	1				
Costo	0,72	1			
Mantenimiento Menor	0,07	-0,12	1		
Mantenimiento Intermedio	0,69	0,84	-0,1	1	
Mantenimiento Mayor	0,8	0,94	-0,13	0,9	1

En la **Figura B19**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo los Costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y Costos son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,94 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura B19

Grafica de costos y Mnto mayor - grupo 600 : habitabilidad y equipamiento general

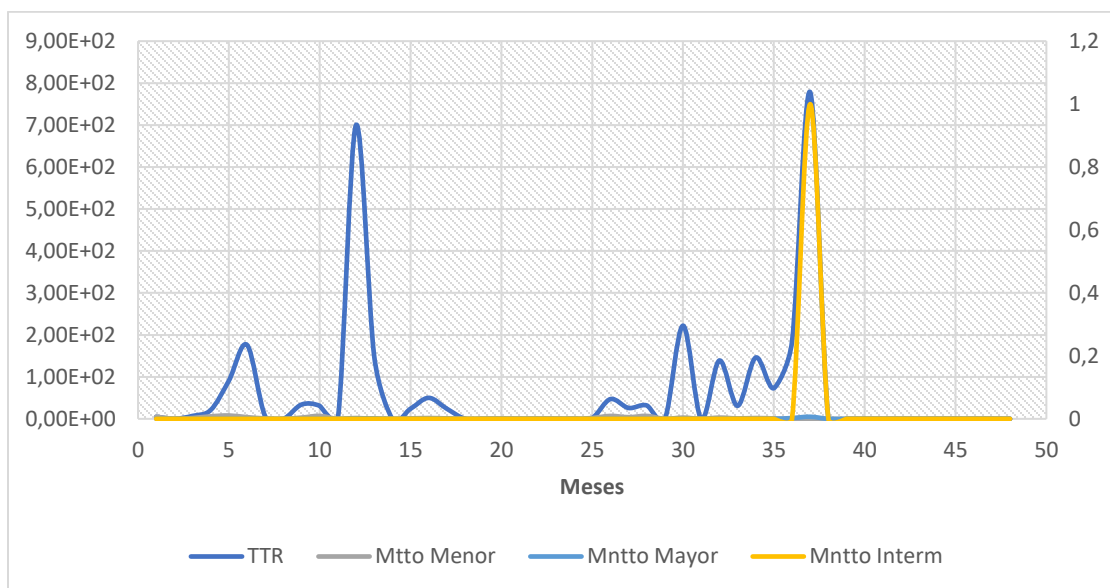


En la **Figura B20**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento intermedio. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Intermedio y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Intermedio y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 12 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,69 entre las variables Mnto Intermedio y TTR. Lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el mantenimiento intermedio aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B20

Grafica de TTR y Mnto intermedio - Grupo 600 : habitabilidad y equipamiento general



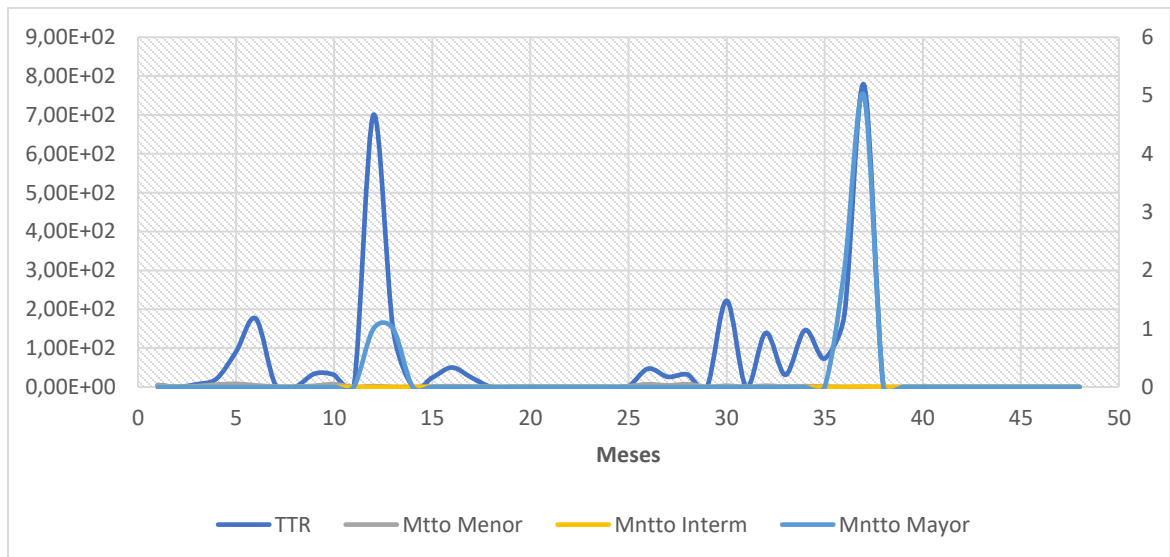
En la **Figura B21**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Mayor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y TTR son los meses 12 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,80 entre las variables Mnto Mayor y TTR, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva

Fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento mayor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B21

Grafica de TTR y Mnto mayor - grupo 600 : habitabilidad y equipamiento general

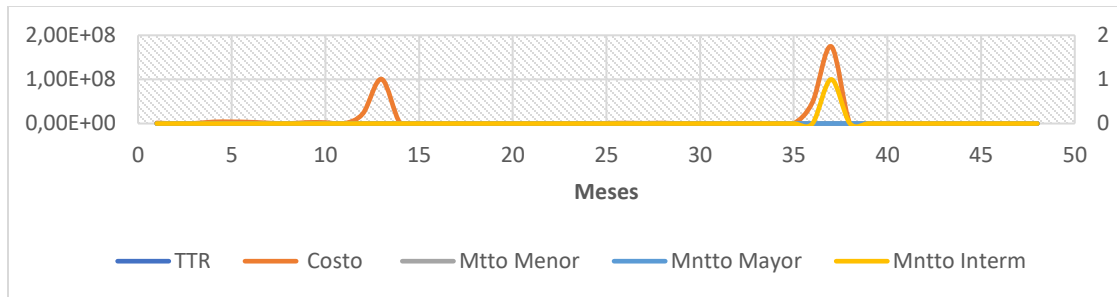


En la **Figura B22**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de mantenimiento intermedio y en el eje izquierdo los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre las actividades de mantenimiento intermedio y los costos a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Intermedio y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento Intermedio y los costos, son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,84 entre las variables Mnto Intermedio y costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Fuerte. Esto significa que a medida que el Mant Intermedio aumenta, los Costos tenderán a aumentar.

Figura B22

Grafica de costos, Mnto intermedio - Grupo 600 : habitabilidad y equipamiento general

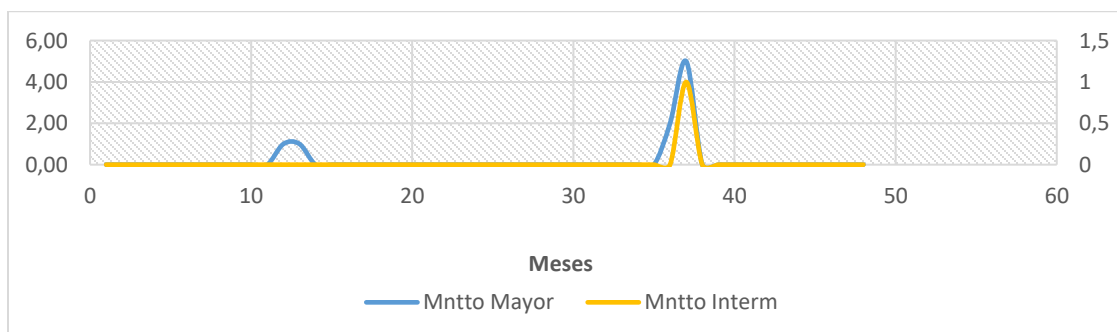


En la **Figura B23**. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el número de actividades de mantenimiento Mayor y el mantenimiento número de actividades de mantenimiento Intermedio a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y Mnto Intermedio. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y el mantenimiento Intermedio, son los meses 13 y 37.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,90 entre las variables Mnto Intermedio y Mnto Mayor, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mnto Intermedio aumenta, el Mnto Mayor Tendra a aumentar.

Figura B23

Grafica de Mnto mayor e intermedio - grupo 600 : habitabilidad y equipamiento general

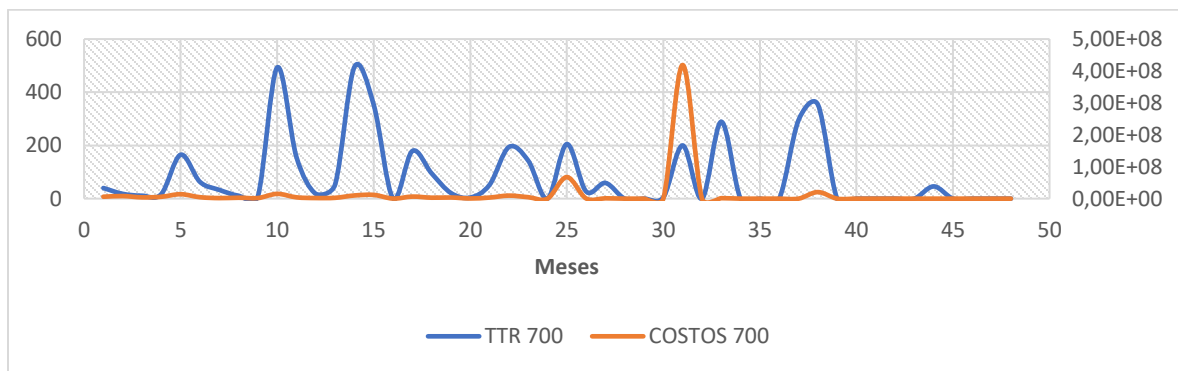


Grupo 700(Armas)

En la **Figura B24.** se muestra en el eje Izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de TTR y costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 31 y 38.

Figura B24

Grafica de TTR y costos - grupo 700 : armas



En la **Tabla B6.** se muestra que el coeficiente de correlación es 0,20 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva débil. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla B6

Análisis de correlación entre el TTR, costos, Mnto mayor, menor e intermedio - Grupo 700

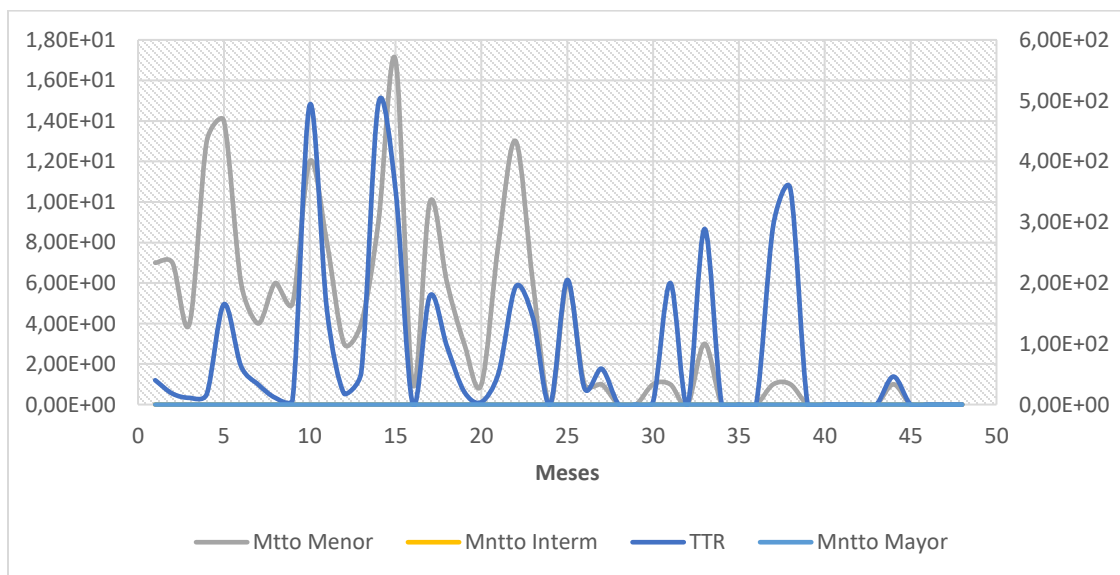
	TTR	Costo	Mtto Menor	Mtto Interno	Mtto Mayor
TTR	1	—	—	—	—
Costo	0,2	1	—	—	—
Mtto Menor	0,54	-0,03	1	—	—
Mtto Interno	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	1	—
Mtto Mayor	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	1

En la **Figura B25**. Se muestra en el eje izquierdo el número de actividades de mantenimiento menor y en el eje derecho el TTR. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento menor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Menor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 5,10,14, 22.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,54 entre las variables Mnto Menor y TTR. Lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Menor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B25

Grafica de TTR y Mnto menor - grupo 700 : armas



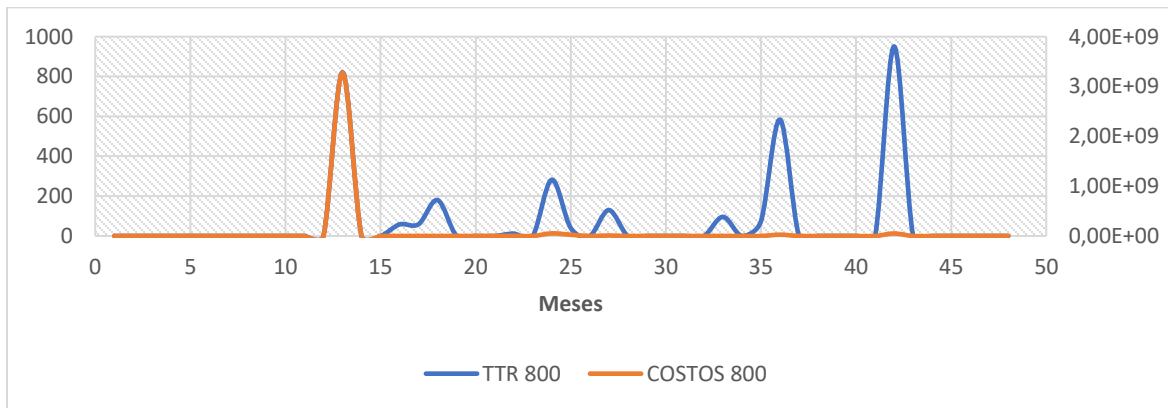
Grupo 800(Integración de Ingeniería)

En la **Figura B26**. Se muestra en el eje Izquierdo el TTR y en el eje derecho los costos. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el TTR y los costos a lo largo

del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de TTR y costos. Los meses con valores más altos de TTR y Costos son los meses 14 y 24.

Figura B26

Grafica de TTR y Costos - grupo 800 : integración de Ingeniería



En la **Tabla B7**. Se muestra que el coeficiente de correlación es 0,58 entre las variables TTR y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el TTR aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Tabla B7

Análisis de correlación entre el TTR, costos, Mnto mayor, menor e intermedio - Grupo 800 :

Integración de Ingeniería

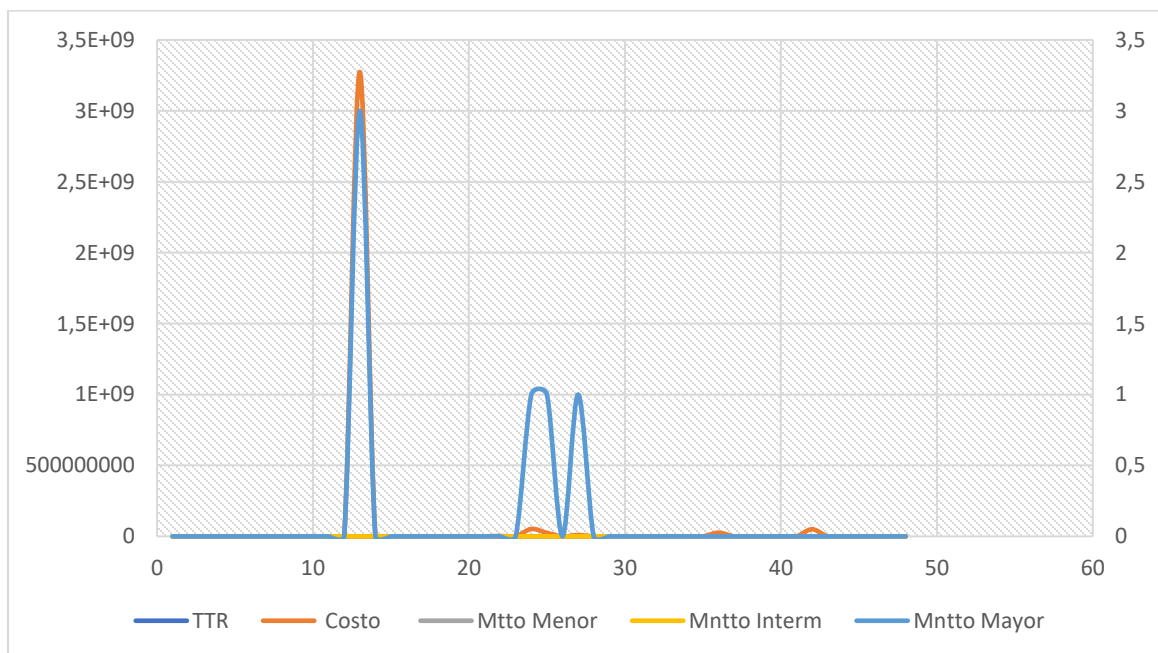
	TTR	Costo	Mtto Menor	Mtto Interno	Mtto Mayor
TTR	1	—	—	—	—
Costo	0,2	1	—	—	—
Mtto Menor	0,54	-0,03	1	—	—
Mtto Interno	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	1	—
Mtto Mayor	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	1

En la **Figura B27**. Se muestra en el eje derecho el número de actividades de Mantenimiento Mayor y en el eje izquierdo los Costos. Se observa que no existe una posible relación o correspondencia entre mantenimiento mayor y los costos a lo largo del periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Mayor y costos. Los meses con valores más altos de mantenimiento mayor y costos son los meses 13,25 y 27.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,87 entre las variables Mnto Mayor y Costos, lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva fuerte. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, los costos tenderán a aumentar.

Figura B27

Grafica de costos, y Mnto mayor - grupo 800 : integración de ingeniería



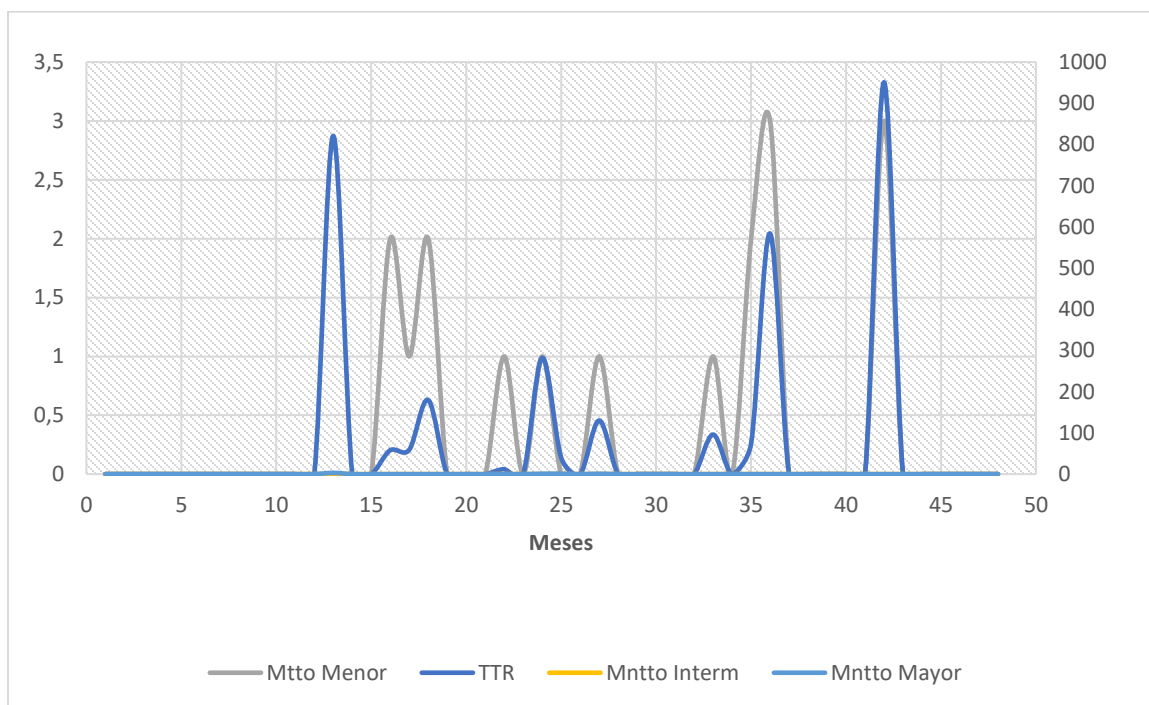
En la **Figura B28**. Se muestra en el eje izquierdo el número de actividades de mantenimiento menor y en el eje derecho el TTR. Se observa que existe una posible relación o

correspondencia entre el mantenimiento menor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48 meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto Menor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento menor y TTR son los meses 18,27,36 y 42.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,63 entre las variables Mnto Menor y TTR. Lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Menor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B28

Grafica de TTR y Mnto menor - grupo 800 : integración de ingeniería



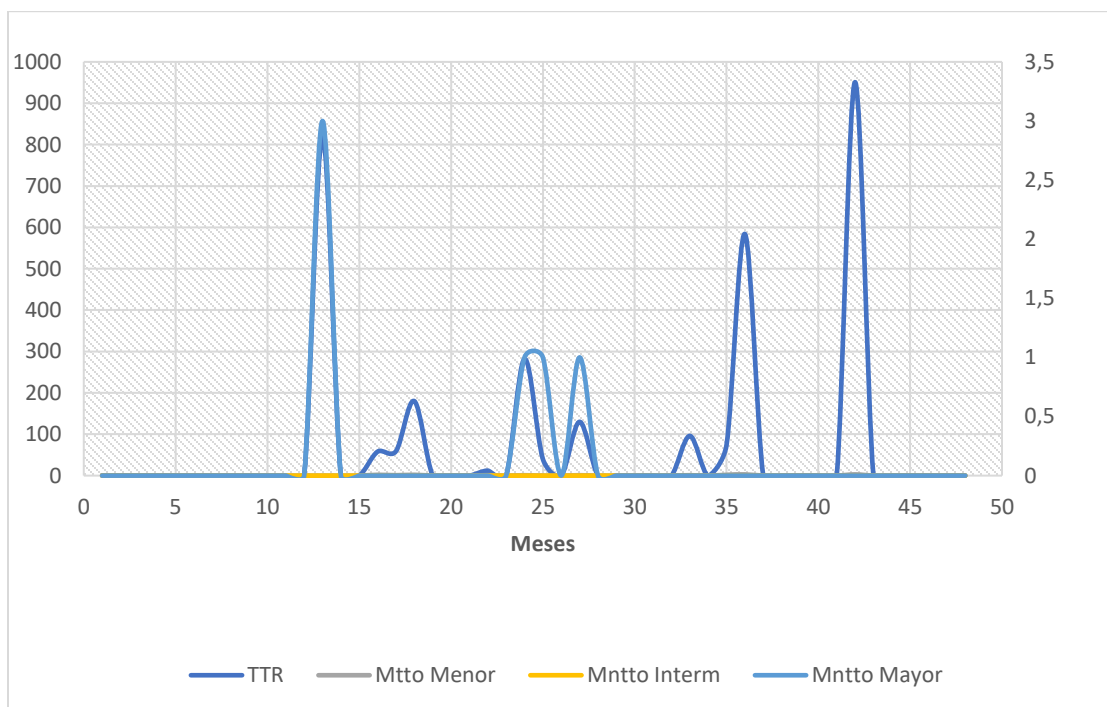
En la **Figura B29**. Se muestra en el eje izquierdo el TTR y en el eje derecho número de actividades de mantenimiento Mayor. Se observa que existe una posible relación o correspondencia entre el mantenimiento Mayor y el TTR a lo largo de periodo evaluado, 48

meses, porque para las mismas frecuencias y/o acontecimientos se observan picos definidos de Mnto mayor y TTR. Los meses con valores más altos de mantenimiento Mayor y TTR son los meses 25 y 27.

De los resultados obtenidos, se muestra que el coeficiente de correlación es 0,55 entre las variables Mnto Mayor y TTR. Lo que indica que puede existir una asociación lineal positiva Moderada. Esto significa que a medida que el Mantenimiento Mayor aumenta, el TTR tenderá a aumentar.

Figura B29

Grafica de TTR y Mnto mayor - grupo 800 : integración de ingeniería



En la **Tabla B8**. Se observa la tabla de significancia **F** Fisher-Snedecor, en este caso para $u = 3$ (número de variables independientes, Mnto menor, Mnto intermedio, Mnto Mayor), $n = 48$ (número de muestras) y v (número de grados de libertad) $= n - u - 1 = 48 - 3 - 1 = 44$.

Tabla B8*Tabla de distribución F de Fisher – Snedecor*

α	v / u	1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	10	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23
0,025		7,21	5,71	5,08	4,72	4,48	4,32	4,2	4,1
0,01		10,56	8	6,99	6,42	6,06	5,8	5,61	5,47
0,005		13,61	10,11	8,72	7,96	7,47	7,13	6,88	6,69
0,05	15	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
0,025		6,94	5,46	4,83	4,47	4,24	4,07	3,95	3,85
0,01		10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,2	5,06
0,005		12,83	9,43	8,08	7,34	6,9	6,54	6,3	6,12
0,05	20	4,54	3,68	3,29	3,06	2,9	2,79	2,71	2,64
0,025		6,2	4,77	4,15	3,8	3,58	3,41	3,29	3,2
0,01		8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4
0,005		10,8	7,7	6,48	5,8	5,37	5,07	4,85	4,67
0,05	30	4,35	3,49	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,25
0,025		5,87	4,46	3,86	3,51	3,27	3,13	3,01	2,91
0,01		8,1	5,85	4,94	4,43	4,1	3,87	3,7	3,56
0,005		9,94	6,99	5,82	5,17	4,76	4,47	4,26	4,09
0,05	60	4	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,1
0,025		5,29	3,93	3,34	3,01	2,79	2,63	2,51	2,42
0,01		7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82
0,005		8,49	5,79	4,73	4,14	3,76	3,51	3,29	3,13
0,05	120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02
0,025		5,15	3,8	3,23	2,89	2,67	2,52	2,39	2,3
0,01		6,85	4,79	3,95	3,48	3,21	2,96	2,79	2,66
0,005		8,18	5,54	4,5	3,92	3,55	3,28	3,09	2,93
0,05	∞	3,84	3	2,6	2,37	2,21	2,09	2,01	1,94
0,025		5,02	3,69	3,12	2,79	2,57	2,41	2,29	2,19
0,01		6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,8	2,64	2,51
0,005		7,88	5,3	4,28	3,72	3,35	3,09	2,9	2,74

Nota. Tomado de Análisis estadístico, Fuentes, Programa de Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander.

En la Tabla **B9**. Se observa la tabla de distribución t de Student, en este caso para $n = 48$ (número de muestras) y v (número de grados de libertad) = 44 y $\alpha = 0,025$, mostrando un valor de t (critico) de 1,96.

Tabla B9

Distribución t de Student, estadístico t

n	0,25	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005
1	1	3,0777	6,3137	12,706	31,821	63,656
2	0,82	1,8856	2,92	4,3027	6,9645	9,925
3	0,76	1,6377	2,3532	3,1824	4,5407	5,8408
4	0,74	1,5332	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041
5	0,73	1,4759	2,015	2,5706	3,3649	4,0321
6	0,72	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074
7	0,71	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995
8	0,71	1,3968	1,8595	2,306	2,8965	3,3554
9	0,7	1,383	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498
10	0,7	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693
11	0,7	1,3634	1,7959	2,201	2,7181	3,1058
12	0,7	1,3562	1,7823	2,1788	2,681	3,0545
13	0,69	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123
14	0,69	1,345	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768
15	0,69	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467
16	0,69	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208
17	0,69	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982
18	0,69	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784
19	0,69	1,3277	1,7291	2,093	2,5395	2,8609
20	0,69	1,3253	1,7247	2,086	2,528	2,8453
21	0,69	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314
22	0,69	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188
23	0,69	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073
24	0,68	1,3178	1,7108	2,0639	2,4922	2,797
25	0,68	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874
26	0,68	1,315	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787
27	0,68	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707
28	0,68	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633
29	0,68	1,3114	1,6991	2,0452	2,462	2,7564
30	0,68	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,75
∞	0,67	1,2816	1,6449	1,96	2,3264	2,5758

Nota. Tomado de Análisis estadístico, Fuentes, Programa de Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander.

En la Tabla **B10**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 3,98$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B10

Análisis de regresión - grupo 100

Estadísticas de la regresión	Columna1
Coefficiente de correlación múltiple	0,519667432
Coefficiente de determinación R ²	0,27005424
R ² ajustado	0,202152309
Error típico	92,6590878
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	136585,5974	34146,4	3,9771216	0,00782799
Residuos	43	369185,3818	8585,71		
Total	47	505770,9792			

	Coefficientes	Error típico	Estadística t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	21,95044992	15,47343806	1,41859	0,1632265	-9,254711921	53,15561175	-9,25471192	53,155612
Costo	-1,34175E-07	3,82507E-07	-0,35078	0,7274669	-9,05575E-07	6,37224E-07	-9,0557E-07	6,372E-07
Mtto Menor	11,61845908	3,058963873	3,79817	0,0004531	5,4494705	17,78744766	5,4494705	17,787448
Mntto Interm	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
Mntto Mayor	86,10384595	168,4205578	0,51124	#NUM!	-253,5485791	425,756271	-253,548579	425,75627

En la **Tabla B11**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 7,11$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B11

Análisis de regresión - grupo 300

Estadísticas de la regresión	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,630840734
Coefficiente de determinación R ²	0,397960031
R ² ajustado	0,341956313
Error típico	94,8898156
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	255930,35	63982,58778	7,105957339	0,00017467
Residuos	43	387175,32	9004,077105		
Total	47	643105,67			

Columna1	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	38,12373808	19,55458	1,94960656	0,057763722	-1,31183152	77,559308	-1,311831524	77,55930769
Costo	5,66249E-07	2,141E-07	2,644185312	0,011384309	1,3438E-07	9,981E-07	1,34377E-07	9,98122E-07
Mtto Menor	4,006049717	4,0575591	0,987305324	0,329016175	-4,1767981	12,188898	-4,176798098	12,18889753
Mntto Interm	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
Mntto Mayor	-7,785640352	58,352565	-0,133424132	#NUM!	-125,464803	109,89352	-125,4648034	109,8935227

En la **Tabla B12.** se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 36.64$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B12

Análisis de regresión - grupo 400

Estadísticas de la regresión	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,879294051
Coefficiente de determinación R ²	0,773158029
R ² ajustado	0,75205645
Error típico	2060,549478
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	622270779	155567694,7	36,63981916	2,4782E-13
Residuos	43	182572158	4245864,151		
Total	47	804842937			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	-155,2018424	388,47868	-0,399511869	0,691493602	-938,643761	628,24008	-938,6437606	628,2400759
Costo	-2,93359E-06	3,454E-06	-0,849367975	0,400380787	-9,8989E-06	4,032E-06	-9,89895E-06	4,03176E-06
Mtto Menor	54,62242234	4,7896568	11,40424559	1,38066E-14	44,9631589	64,281686	44,96315885	64,28168582
Mntto Interm	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
Mntto Mayor	2257,429746	1509,6551	1,495328183	#NUM!	-787,079821	5301,9393	-787,0798215	5301,939312

En la **Tabla B13**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 21.10$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B13*Análisis de regresión - grupo 500*

<i>Estadísticas de la regresión</i>	<i>Valor</i>
Coefficiente de correlación múltiple	0,81
Coefficiente de determinación R ²	0,66
R ² ajustado	0,63
Error típico	379,05
Observaciones	48,00

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4,00	12124118,01	3031029,50	21,10	0,00
Residuos	43,00	6178057,30	143675,75		
Total	47,00	18302175,31			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	149,78	81,18	1,85	0,07	-13,93	313,48	-13,93	313,48
Costo	0,00	0,00	1,06	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Mtto Menor	0,78	3,69	0,21	0,83	-6,65	8,21	-6,65	8,21
Mntto Interm	115,09	27,87	4,13	0,00	58,88	171,31	58,88	171,31
Mntto Mayor	94,00	56,43	1,67	0,10	-19,80	207,81	-19,80	207,81

En la **Tabla B14**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 22.51$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B14

Análisis de regresión - grupo 600

Estadísticas de la regresión	Columna1
Coefficiente de correlación múltiple	0,822659524
Coefficiente de determinación R ²	0,676768692
R ² ajustado	0,646700663
Error típico	91,33626763
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	751072,4239	187768,106	22,50791697	4,4288E-10
Residuos	43	358719,4927	8342,313785		
Total	47	1109791,917			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	13,38267118	16,64940164	0,803792921	0,425937937	-20,1940472	46,9593896	-20,19404723	46,9593896
Costo	-1,04296E-06	1,30178E-06	-0,801179902	0,427432545	-3,6682E-06	1,5823E-06	-3,66824E-06	1,58233E-06
Mtto Menor	12,25830757	5,863525407	2,090603643	0,042510383	0,43338163	24,0832335	0,433381626	24,08323352
Mntto Interm	-193,2406902	210,5491347	-0,917793799	0,363846273	-617,853488	231,372107	-617,8534877	231,3721073
Mntto Mayor	228,0033555	60,65096233	3,759270203	0,000509311	105,689033	350,317678	105,6890329	350,3176781

En la **Tabla B15**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 7.36$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B15

Análisis de regresión - grupo 700

Estadísticas de la regresión	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,637429031
Coefficiente de determinación R ²	0,406315769
R ² ajustado	0,351089329
Error típico	105,8025435
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	329434,3162	82358,57905	7,357268887	0,00013177
Residuos	43	481349,663	11194,17821		
Total	47	810783,9792			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	18,82906834	20,38407718	0,923714533	0,36078961	-22,2793411	59,9374778	-22,2793411	59,93747778
Costo	4,68646E-07	2,54522E-07	1,8412779	0,072486219	-4,4647E-08	9,8194E-07	-4,46468E-08	9,81939E-07
Mtto Menor	15,85591438	3,406521909	4,654575782	3,11059E-05	8,98600822	22,7258205	8,986008217	22,72582054
Mntto Interm	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
Mntto Mayor	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0

En la **Tabla B16**. Se observan los resultados del análisis de regresión tomando como variable dependiente (Y) el TTR y variables independientes (X) los costos, mantenimientos mayor, menor e intermedio.

A partir del resultado de $F = 37.48$ y comparándolo con el $F_{\text{crítico}}$ de 2.62 se concluye que se rechaza la hipótesis de H_0 y, en consecuencia, se puede indicar que existe suficiente evidencia para concluir que el modelo de regresión explica parte de la variación en el TTR (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero) con un índice de confianza del 0.95.

Tabla B16

Análisis de regresión - grupo 800

Estadísticas de la regresión	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,881542622
Coefficiente de determinación R ²	0,777117394
R ² ajustado	0,756384128
Error típico	97,83177324
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	1434956,577	358739,1443	37,48166866	1,7053E-13
Residuos	43	411555,4018	9571,055856		
Total	47	1846511,979			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	-11,377589	16,01867018	-0,710270507	0,481370948	-43,6823162	20,9271382	-43,6823162	20,9271382
Costo	2,24324E-07	6,22379E-08	3,604289603	0,000807805	9,8809E-08	3,4984E-07	9,88088E-08	3,49838E-07
Mtto Menor	167,5496478	18,25862985	9,17646336	1,0965E-11	130,727611	204,371684	130,7276115	204,3716842
Mntto Interm	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
Mntto Mayor	35,47190198	59,98188265	0,591376936	#NUM!	-85,4930929	156,436897	-85,49309285	156,4368968

En la Tabla **B17**. Se observan los datos del mantenimiento ejecutado a las fragatas de Colombia durante un periodo de 5 años, este archivo está en formato Excel y contiene 12420 filas.

Tabla B17

Datos del mantenimiento ejecutado a las fragatas de Colombia

Unidad	GC	Orden	Sistema/Equipo	Fabricante del equipo	Modelo del equipo	Clase de Mantenimiento	Incidente/ Trabajo	Lead Time TTR	Costos Plan	Costos Esp.	Pendi. Factur	Requerim.	Estado Necesidad
ARC CALDAS	200	110090872	MOTOR PROPULSOR	MTU	16V 4000M90	MANTEN_X	00110/2022	2.812.813,80	4.070.439,80	\$ 0	100,00%	Manten.	EECU/74245
ARC ALMIRANTE PADILLA	200	600153786	MOTOR PROPULSOR	MTU	16V 4000M90	MANTEN_X Contrato Nivel4	00039/2022	3.185.813,70	3.185.813,70	\$ 0	100,00%	Manten.	EECU/74245
ARC ALMIRANTE PADILLA	200	600153786	MOTOR PROPULSOR	MTU	16V 4000M90	MANTEN_X Contrato Nivel4 ACTIVIDADES	00039/2022	3.185.813,70	3.185.813,70	\$ 0	100,00%	Manten.	EECU/74245
ARC CALDAS	200	600153752	MOTOR PROPULSOR	MTU	16V 4000M90	COMPLEMEN TARIAS	00036/2022	3.185.813,70	3.185.813,70	\$ 0	100,00%	Manten.	EECU/74245
ARC INDEPENDIENTE	200	110123440	MOTOR PROPULSOR	MTU	16V 4000M90	MANTEN_X	00414/2022	2.562.560,40	2.562.560,40	\$ 0	100,00%	Manten.	EECU/74245
ARC INDEPENDIENTE	200	110123441	MOTOR PROPULSOR	MTU	16V 4000M90	MANTEN_X Contrato Nivel4	00414/2022	2.562.560,40	2.562.560,40	\$ 0	100,00%	Manten.	EECU/74245

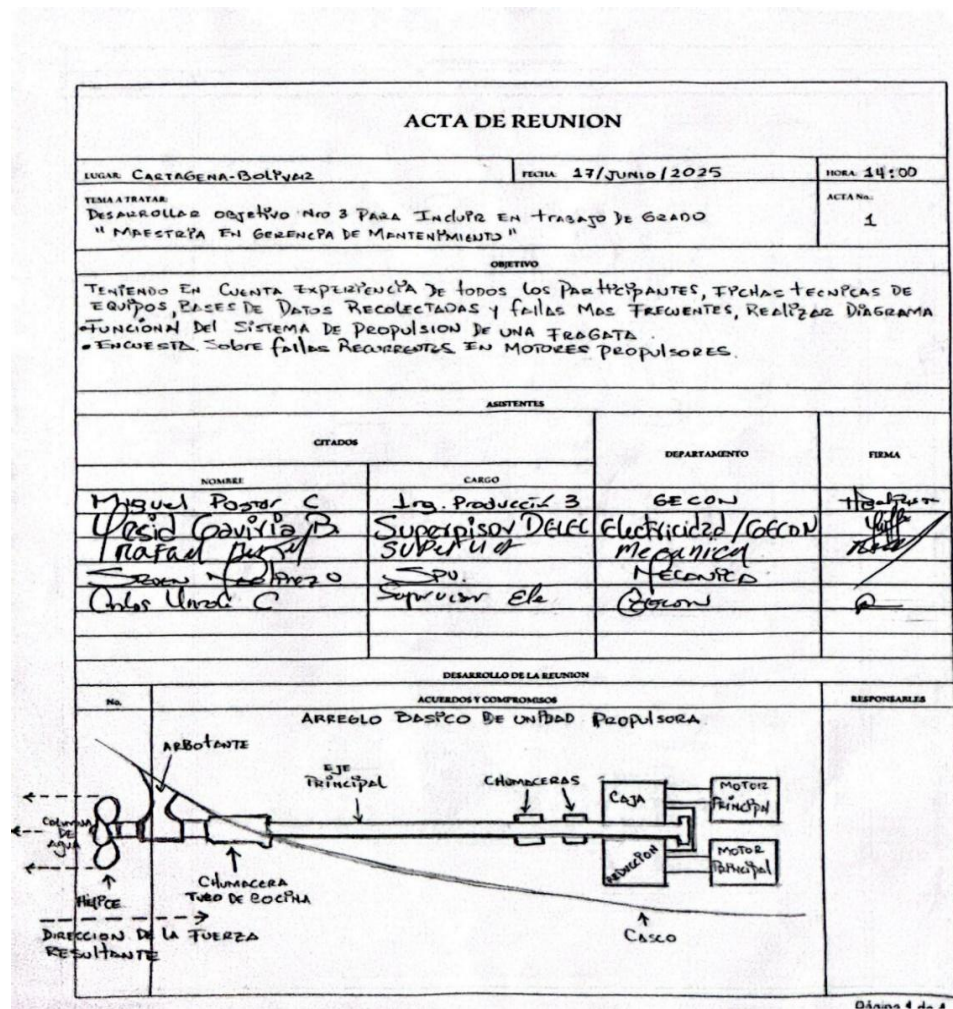
Nota. Fuente: Datos Obtenidos de P.G.A. Armada Nacional de Colombia.

Apéndice C. Desarrollo de la metodología de análisis mixto en la fragata ARC caldas

En la **Figura C1**. Se observa acta de reunión Nro. 1, evidencia del análisis inicial realizado al sistema de propulsión. (Actividad Grupal).

Figura C1

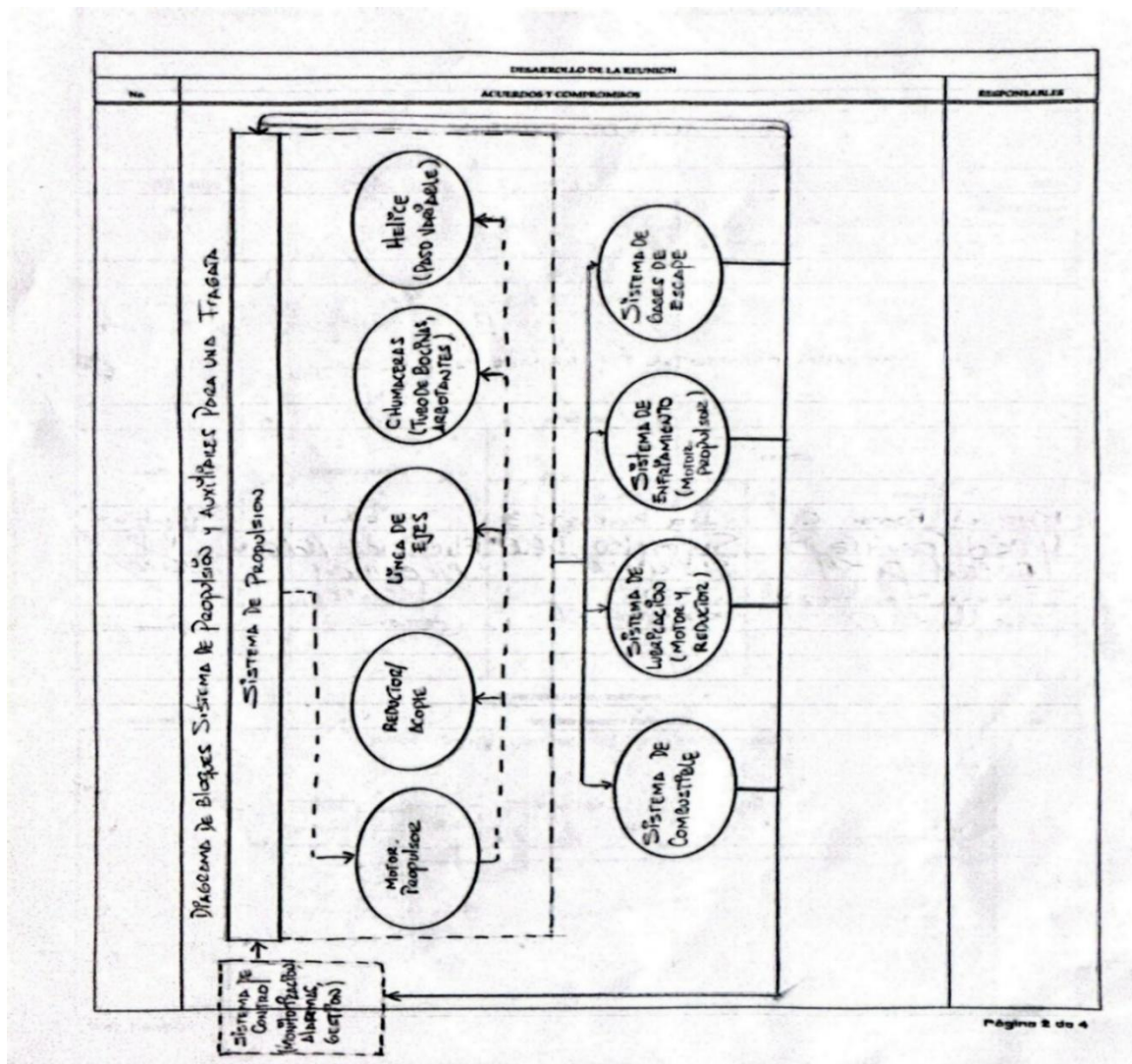
Desarrollo de metodología mixta de análisis



En la **Figura C2**. Se observan los elementos que componen del sistema de propulsión y los sistemas auxiliares requeridos para su correcta operación.

Figura C2

Diagrama de bloques funcional del sistema de propulsión y auxiliares en la fragata ARC Caldas



En la **Figura C3**. Se observa encuesta realizada a personal con más de 10 años de experiencia en mantenimiento, reparación y construcción de embarcaciones navales, en este caso aspectos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Figura C3

Elaboración de encuesta de fallas recurrentes en el sistema de propulsión . motores propulsores de la fragata ARC Caldas - parte A

No.	DESARROLLO DE LA REUNION ACUERDOS Y COMPROMISOS	RESPONSABLES
	<p>ELABORACION DE ENCUESTA DE FRECUENCIA DE FALLAS</p> <p>INSTRUCCIONES</p> <p>SE LISTAN FALLAS FRECUENTES POR SUBSISTEMA DEL MOTOR MTU 1163 MCCAIR CON UNA "X" LA CASILLA QUE REPRESENTA CON MAYOR PRECISION LA FRECUENCIA CON LA QUE USTED HA OBSERVADO CADA FALLA EN SU EXPERIENCIA PROFESIONAL:</p> <p>1. NUNCA 2. RARA VEZ 3. FRECUENTE 4. MUY FRECUENTE.</p> <p>* FALLAS MECANICAS</p> <p>→ SUBSISTEMA DE COMBUSTIBLE</p> <p>FALLA</p> <ul style="list-style-type: none"> • GOTEO DE COMBUSTIBLE (INYECTORES) • OBSTRUCCION DE FILTROS • FUGAS EN BOMBA DE INYECCION • AIRE EN LAS LINEAS DE COMBUSTIBLE • BAJA PRESION DE COMBUSTIBLE • GOLPETEO EN EL SISTEMA • RETORNO DE COMBUSTIBLE INADECUADO • MAL AJUSTE (INYECTORES) • CONTAMINACION POR AGUA • GOTEO EN ACOPLIAMIENTOS <p>→ SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO</p> <p>FALLA</p> <ul style="list-style-type: none"> • SOBRECALENTAMIENTO DEL MOTOR • FUGAS DE REFRIGERANTE • CORROSION INTERNA EN INTERCAMBIADORES • PERDIDA DE PRESION EN EL SISTEMA • BLOQUEO DE FLUIDO • AIRE ATRAPADO EN EL SISTEMA • FUGAS EN JUNTA DE LA CULATA • TERMOSTATO DEFECTUOSO (PI MECANICA) • VALVULA DE SOBREPRESION ATRAPADA <p>→ SUBSISTEMA DE LUBRICACION</p> <p>FALLA</p> <ul style="list-style-type: none"> • PRESION BAJA DE ACEITE • FUGAS EN EL SISTEMA • CONTAMINACION DEL ACEITE • OBSTRUCCION DE FILTRO DE ACEITE • SOBRECALENTAMIENTO DE ACEITE • NIVEL BAJO DE ACEITE • VALVULA DE ALIVIO DEFECTUOSA • SELLO DE EJE CON FUGA <p>→ SUBSISTEMA MECANICO INTERNO</p> <p>FALLA</p> <ul style="list-style-type: none"> • GOLPETEO DEL MOTOR • PERDIDA DE COMPRESION • RUIDO ANORMAL (ARRO DE LEVAS) • DESAJUSTE DEL CRUJEJA • VIBRACIONES INTERNAS <p>→ SUBSISTEMA DE PROPULSION/TRANSMISION</p> <p>FALLA</p> <ul style="list-style-type: none"> • VIBRACION EN EJES • RUIDO EN REDUCTORA • FUGAS EN ACOPLIAMIENTOS • SOBRECALENTAMIENTO DEL EJE • GOLPETEO AL ENGRANAR • AFLOJAMIENTO DE PERNOS • DIFICULTAD AL TRANSMITIR POTENCIA • HUMO O FUGA POR EJE • ROTURO DE SOPORTE • FALLA DE EMBRAGUE <p>→ * FALLAS ELECTRICAS/ELECTRONICAS</p> <p>→ SUBSISTEMA DE COMBUSTIBLE</p> <ul style="list-style-type: none"> • FALTA EN AJUSTE BOMBA DE COMBUSTIBLE • NO ARRANCA BOMBA DE TRANSFERENCIA • VARIACIONES DE VOLTAJE EN SENSORES DE PRESION • SENAL ERRATICA EN SENSOR DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE • FALSA ALARMA DE FUGA DE COMBUSTIBLE • PARO ELECTRICO DE BOMBA • SENAL PERIODICA EN UNIDAD DE CONTROL DE LA BOMBA • SENSOR DE NIVEL NO RESPONDE • INESTABILIDAD DE ACTUADOR ELECTRICO DE VALVULA • NO RESPONDE VALVULA ELECTRICA 	

En la **Figura C4**. Se observa encuesta realizada a personal con más de 10 años de experiencia en mantenimiento, reparación y construcción de embarcaciones navales, en este caso aspectos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Figura C4

Elaboración de encuesta de fallas recurrentes en el sistema de propulsión - motores propulsores de la fragata ARC Caldas - parte B

DESARROLLO DE LA REUNION		
№	ACUERDOS Y COMPROMISOS	RESPONSABLES
	<p>→ SUBSISTEMA DE ENFRÍAMIENTO</p> <ul style="list-style-type: none"> • BOMBA DE AGUA NO ARRANCA • FALSA LECTURA DE TEMPERATURA • ACTIVACION TARDIA DE VENTILADORES • PARO INESPERADO DE BOMBA • FLUCTUACION DE SEÑAL EN SENSOR DE PRESION • FALLO DE ALARMA DE ALTA TEMPERATURA • SOBRECALENTAMIENTO DE MOTOR ELECTRICO DE LA BOMBA • RELAY DE LA BOMBA C/ELA ERRATICAMENTE • PERDIDA DE SEÑAL DE CONTROL EN VALVULA MOTOR/PRADA <p>→ SUBSISTEMA DE LUBRICACION</p> <p>Fallo</p> <ul style="list-style-type: none"> • SENSOR DE PRESION DE ACEPTE SIN LECTURA • ALARMA DE BAJA PRESION, SIN RAZON REAL • FALSA SEÑAL DE NIVEL BAJO • MOTOR ELECTRICO DE BOMBA DE ACEPTE NO OPERA • SENSOR DE TEMPERATURA NO RESPONDE • LUZ DE ADVERTENCIA ENCENDIDA PERMANENTEMENTE • FALLO EN ACCIONAMIENTO DE VALVULA ELECTRICA • ALIMENTACION INTERROMPIDA AL SISTEMA. <p>→ SUBSISTEMA MECANICO INTERNO</p> <p>Fallo</p> <ul style="list-style-type: none"> • SENSOR DE POSICION DE ARBOI NO ENVIA SEÑAL • SEÑAL INTERROMPIDA DEL PMS • INTERFERENCIA EN SENSORES • SIN SEÑAL DE COMPRESION • ALARMAS ERRONEAS DE SUPERCALENTAMIENTO • SEÑAL DE VELOCIDAD FLUCTUANTE 	<ul style="list-style-type: none"> • LECTURA ERRONEA DE SENSORES INTERNOS • CORTO EN SISTEMA DE DETECCION DE FALLAS INTERNAS <p>→ SUBSISTEMA DE PROPULSION / TRANSMISION</p> <p>Fallo</p> <ul style="list-style-type: none"> • FALLO EN SENSORES DE VELOCIDAD DE EJES • PARO DE MOTOR ELECTRICO DE CONTROL DE EMBRAQUE • SEÑAL PERDIDA EN POSICION DE PASO DE HELICE • ALARMA DE FALLO DE MOTOR ELECTRICO DEL TIMON • INTERFERENCIA EN SISTEMA DE CONTROL • SENSOR DE PRESION DE EMBRAQUE NO RESPONDE • ENCODER DE ALINEACION DENTADO • FALLO EN TABLERO DE CONTROL DE PROPULSION • FLUCTUACION EN SISTEMA DE EXCITACION • DESCONEXION DE SENSORES POR VIBRACION

En la **Figura C5**. Se observan que las fallas más recurrentes en los motores propulsores son: Corrosión interna de intercambiadores-sistema de enfriamiento, obstrucción de filtros-sistema de combustible y fugas en el sistema de lubricación.

Figura C5

Resultados de encuesta sobre fallas recurrentes en motores propulsores de una fragata

ACTA DE REUNION			
LUGAR: CARTAGENA - BOLIVAR		FECHA: 17/JULIO/2025	HORA: 13:00
TEMA A TRATAR: DESARROLLAR OBJETIVO NRO 3 PARA INCLUIR EN TRABAJO DE GRADO " MAESTRIA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO "			ACTA No: 2
OBJETIVO			
TENIENDO EN CUENTA EXPERIENCIA DE TODOS LOS PARTICIPANTES, FICHAS TECNICAS DE EQUIPOS, BASES DE DATOS RECOLECTADA, FALLAS MAS FRECUENTES Y RESULTADOS DE ENCUESTA, REALIZAR:			
<ul style="list-style-type: none"> • ANALISIS DE CAUSA RAIZ • ARBOL DE FALLAS 			
ASISTENTES			
CITADOS		DEPARTAMENTO	FIRMA
NOMBRE	CARGO		
Miguel Pastor C	Ing. Producción 3	GECON/GECON	
Diego Cavia B	Supervisor DELE	Electrónica-Electm	
Roberto B...	Supervisor	Mecánica	
Steven C	SPV. MECANICA	TECENTRA	
Carlos Unzueta C	Supervisor	GECON	
DESARROLLO DE LA REUNION			
No.	ACUERDOS Y COMPROMISOS		RESPONSABLES
	LUEGO DE ANALIZAR LOS RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE LAS FALLAS RECURRENTES EN EL SISTEMA DE PROPULSION DE UNA FRAGATA CON MOTORES PROPULSORES MTU 1163 SE OBTIENEN LOS SIGUIENTES RESULTADOS:		
	Falla	Subsistema	VECES REPORTADAS COMO FRECUENTE O MUY FRECUENTE
1.	Corrosión interna en intercambiadores	ENFRIAMIENTO	8 (CRITICA).
2.	Obstrucción de filtros	COMBUSTIBLE	6 (CRITICA).
3.	Fugas en el sistema	LUBRICACION.	6 (CRITICA)

En la **Tabla C1**. Se observa el análisis de causa raíz de las fallas más recurrentes en el sistema de enfriamiento, causas primarias y sub-causas con valores operativos reales.

Tabla C1

Análisis de causa—raíz, motores propulsores MTU 1163 - Sistema de enfriamiento

DESARROLLO DE LA REUNION			
No.	ACUERDOS Y COMPROMISOS		RESPONSABLES
ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ - MOTOR PROPULSOR MTU 1163			
FALLA CRÍTICA	TIPO DE SISTEMA	CAUSA PRIMARIA	SUBCAUSAS
CORROSIÓN INTERNA EN EL INTERCAMBIADOR	ENFRÍAMIENTO	SISTEMA CERRADO (S.C.) AGUA TRATADA FUERA DE VALORES OPERATIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • DEGRADACIÓN DE PROPIEDADES DEL INHIBIDOR DE CORROSIÓN - EFECTIVIDAD 90 A 95% DE CONCENTRACIÓN - SÍMPTOMAS ALCALINOS < 1% - SALES DE ÁCIDOS ORGÁNICOS > 2% • TEMPERATURA DEL AGUA TRATADA > 95°C • PORCENTAJE DE MEZCLA DE AGUA DESMIE-RAIZADA/INHIBIDOR DE CORROSIÓN FUERA DE VALOR PERMISIBLE < 30%
		SISTEMA CERRADO (OXÍGENO RESULTA EN EL REFRIGERANTE)	<ul style="list-style-type: none"> • NIVEL DEL TANQUE DE EXPANSIÓN FUERA DEL RANGO PERMISIBLE (20 A 35 LITROS DEL 30 AL 60% DEL VOLUMEN TOTAL) • PRESIÓN POR DEBATO DE 1,5 BARES • VALVULA DE ALIVIO DEL TANQUE DE EXPANSIÓN EN MAL ESTADO. ACCIONAMIENTO A PRESIÓN > 1,8 bar
		SISTEMA ABIERTO (CONTAMINACIÓN DE AGUA DE MAR CON ACEITE)	<ul style="list-style-type: none"> • PRESIÓN DIFERENCIAL ENTRE EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN DEL MOTOR Y SISTEMA DE ENFRÍAMIENTO CERRADO > 3,5 BAR • PRESIÓN EN EL INTERCAMBIADOR < 1,5 BAR PERDIDA DE SELLADO - CRUCE DE ACEITE - AGUA DE MAR. • TEMPERATURA DE ACEITE EN EL INTERCAMBIADOR > 100°C, GENERA MICROFILTRACION DE ACEITE
		SISTEMA ABIERTO (REGISTRACION ACELERADA DE ANODOS DE SACRIFICIO)	<ul style="list-style-type: none"> • CLORUROS > 22000 PPM • TEMPERATURA DEL AGUA MAYOR A LA SALIDA DEL INTERCAMBIADOR > 45°C • FLUJO TURBULENTO, VELOCIDAD DEL AGUA MAYOR A 4m/s

En la **Tabla C2**. Se observa el análisis de causa raíz de las fallas más recurrentes en el sistema de combustible, causas primarias y sub-causas con valores operativos reales.

Tabla C2

Análisis de causa – raíz - motores propulsores MTU 1163 - sistema de combustible

DESARROLLO DE LA REUNION				
Nº	ACUERDOS Y COMPROMISOS		RESPONSABLES	
Falla crítica	ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ - MOTOR PROPULSOR MTU 1163			
Falla crítica	Tipo de sistema	CAUSA PRIMARIA	Subcausas	
OBSTRUCCION DE FILTROS	COMBUSTIBLE	PRESENCIA DE AGUA EN EL COMBUSTIBLE	<ul style="list-style-type: none"> • CONTENIDO DE AGUA SUPERIOR A 0,05% • FILTRO SEPARADOR DE AGUA MAYOR A 30 MICRONES • DRENAJE DE AGUA MAYOR A 8 HORAS. 	
		INTERVALO INCORRECTO DE CAMBIO DE FILTROS	<ul style="list-style-type: none"> • TIEMPO DE CAMBIO DE FILTROS MAYOR A 500 HORAS • PRESION DIFERENCIAL EN FILTRO MAYOR A 1 BAR 	
		ALTA CONCENTRACION DE PARTICULAS SOLIDAS (SEDIMENTOS)	<ul style="list-style-type: none"> • EFICIENCIA DE FILTROS MENOR A 98% • COMBUSTIBLE FUERA DE ESPECIFICACION (Nº ISO 8217 - DMA) • FILTROS PREVIOS MAYOR A 30 MICRONES AFECTAN FILTROS FINOS 5-15 MICRONES 	
		CRECIMIENTO BIOLÓGICO EN LINEAS.	<ul style="list-style-type: none"> • PORCENTAJE DE AGUA MAYOR A 0,05% DE COMBUSTIBLE (ESTO CREA SLUDGE). • ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE SIN BIOPIDAS UN TIEMPO MAYOR A 6 MESES. 	
			<ul style="list-style-type: none"> • FRECUENCIA DE LIMPIEZA DE TANQUES MAYOR A 12 MESES. 	

En la Tabla C3. se observa el análisis de causa raíz de las fallas más recurrentes en el sistema de lubricación, causas primarias y sub-causas con valores operativos reales.

Tabla C3

Análisis de causa -- raíz -- motores propulsores MTU 1163 - sistema de lubricación

DESARROLLO DE LA REUNION			RESPONSABLES	
No	ACUERDOS Y COMPROMISOS			
	ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ - MOTOR PROPULSOR			
FALLA CAUSADA	TIPO DE SISTEMA	CAUSA PRIMARIA	SUBCAUSAS	
FUGAS EN EL SISTEMA	LUBRICACION	SOBREPRESION EN EL SISTEMA	<ul style="list-style-type: none"> FALLA EN VALVULA DE ALIVIO > A 7,8 bar SIN ACCIONARSE ACEPTE DEMASIADO VISCOSO A TEMPERATURA BAJA (DIFERENTE A LA VISCOSIDAD SAE 40) TEMPERATURA DE ACEPTE MAYOR A 105°C, DEGRADA PROPIEDADES DEL ACEPTE Y PRODUCE LODOS 	
		DEGRADACION DE SELLOS, EMPAQUES O RETENEDORES	<ul style="list-style-type: none"> EXPOSICION A TEMPERATURA MAYORES A 105°C USO DE ACEPTE DIFERENTE AL SAE 40 EXPOSICION PROLONGADA A PRESIONES MAYORES A 7,8 bar 	
		CAUDAL DE ACEPTE FUERA DE PARAMETROS "CAUDAL TIPICO" 300-450 L/min	<ul style="list-style-type: none"> FRECUENCIA DE CAMBIO DE ACEPTE MAYOR A 500 HORAS CANTIDAD TOTAL DE ACEPTE EN EL SISTEMA MENOR A 350 LITROS. CONSUMO DE ACEPTE MAYOR A 0,8 A 1,2 LITROS/HORA 	
		DETERIORO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (ENTRADOR DE ACEPTE).	<ul style="list-style-type: none"> INSPECCIONES EN UN TIEMPO MAYOR A 1000 HORAS. EXCESO DE TEMPERATURA POR BAJA EFICIENCIA TERMICA (TEMPERATURA A LA SALIDA MAYOR A 95°C) PRESION EXCESIVA EN EL LADO DEL ACEPTE MAYOR A 6 bar 	

En la **Figura C8**. Se observa acta de reunión Nro. 3, diligenciada durante el desarrollo del FMECA realizado al sistema de propulsión. (Actividad Grupal).

Figura C8

Desarrollo de metodología mixta de análisis

ACTA DE REUNION			
LUGAR: <u>CORTAGENA - COLIMA</u>		FECHA: <u>8/AGOSTO/2025.</u>	HORA: <u>13:00</u>
TEMA A TRATAR: <u>DESARROLLAR OBJETIVO NRO 3 PARA INCLUIR EN TRABAJO DE GRADO "MAESTRIA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO"</u>			ACTA No.: <u>3</u>
OBJETIVO			
<p>TENIENDO EN CUENTA LA EXPERIENCIA DE TODOS LOS PARTICIPANTES, ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ Y ARBOL DE FALLAS, REALIZA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • FMECA. 			
ASISTENTES			
CITADOS		DEPARTAMENTO	FIRMA
NOMBRE	CARGO		
<u>Miguel Pastor Cendales</u>	<u>Jng. Producción 3</u>	<u>GECON</u>	<u>[Firma]</u>
<u>Yosid Carolina B.</u>	<u>Supervisor DELEC</u>	<u>GECON Ele-tele</u>	<u>[Firma]</u>
<u>[Firma]</u>	<u>[Firma]</u>	<u>GECON medicina</u>	<u>[Firma]</u>
<u>[Firma]</u>	<u>SPU</u>	<u>GECON</u>	<u>[Firma]</u>
<u>Carlos Urzala</u>	<u>Supervisor ele</u>	<u>GECON</u>	<u>[Firma]</u>
DESARROLLO DE LA REUNION			
No.	ACUERDOS Y COMPROMISOS		RESPONSABLES

En la **Tabla C4**. Se observa FMECA realizado al sistema de propulsión. Parte A. (Actividad Grupal).

Tabla C4

FMECA motor propulsor MTU 1163

FMECA MOTOR Propulsor MTU 1163

FALTA CRÍTICA.	MODO DE FALLA	CAUSA PRIMARIA	SOLUCIONES (DATOS TÉCNICOS REALES)	EFFECTOS POTENCIALES	S	O	D	RPN	NIVEL DE GRAVEDAD	ACTIVIDADES DE MITO RECOMENDADAS.	%	RESPONSABLES
Corrosión Intermitente en Intercambiador	Deposición de sales en intercambiador	Agua para limpieza de intercambiador	Agua para limpieza de intercambiador Sales > 20ppm Sales > 1000	Pérdida de eficiencia térmica	9	6	5	270	MUY ALTA	<ul style="list-style-type: none"> Análisis químico del refrigerante cada 500 h. Reposición de intercambiadores cada 500 h. Uso de mezcla según MTL's OMB Cada lavado y deposición Control con refractómetro % de Etileglicol (entre 90, 95 %). 		
	Alta temperatura del refrigerante	Maneja mal de salina	Interiores Flujo turbulento > m/s	Aumento de presión Cavitación Detartraje	8	6	6	288	MUY ALTA	<ul style="list-style-type: none"> Control a válvula termostática 250h Verificación de sensores de temperatura 250h Medición de conductividad con fluorómetro (500h) Limpieza de pasajes del intercambiador 500h 		
	Contaminación de aceite	Fuga de agua	Contenido de agua > 0.5 mg/l > 1000	Taponamiento de tuberías	9	5	5	225	MUY ALTA	<ul style="list-style-type: none"> Verificación presión diferencial (semanal) Puebas hidráulicas (1000h) Sustitución de juntas (2000h) Análisis hidrocarburos en cada 250 h. 		
	Filtración de agua	Agua > A	Sequestrante intermitente Densidad Presión > 8h	Baja potencia Densidad Impurezas	7	6	5	210	MUY ALTA	<ul style="list-style-type: none"> Revisión de uso separador (diaria) Cambio de elemento separador (250h) Prueba manual cada 8h Uso de prefiltro de 30 micras 		
	Intercambio de aceite	Exceso de agua	Viscosidad Fuerza de corte A 40 C	Caída de presión Perdida de suministro	7	5	4	140	ALTA	<ul style="list-style-type: none"> Cambio de filtros (250-400 h) Medición AP (semanal) Análisis de viscosidad cada 500h Cambio de prefiltro cada (250h) 		
	Crecimiento biológico	Contaminación biológica	Alimentación > 6 meses sin > A 0,05% biocida (sludge) Limpieza de tanques > 12 meses	Obstrucción de líneas Reducción de carga	7	5	5	175	MUY ALTA	<ul style="list-style-type: none"> Desinfección de bloques con Oralea Limpieza de tanques (1000h) Revisión de sedimentos (250h) Análisis microbiológico (trimestral) 		

En la **Tabla C5**. Se observa FMECA realizado al sistema de propulsión. Parte B.
(Actividad Grupal).

Tabla C 5

FMECA motor propulsor MTU 1163, parte B

FMECA MOTOR PROPULSOR MTU 1163

FALLA CRÍTICA	MODOS DE FALLA	CAUSA PRIMARIA	SUBCAUSAS (DATOS TÉCNICOS REALES)	EFECTOS POTENCIALES	S	O	D	RPN	NIVEL DE RIESGO	ACTIVIDADES DE MTO RECOMENDADAS	RESPONSABLES
FUGAS DE ACEITE	SOPREPRESION VALVULA DE ALIVIO EN SISTEMA	VALVULA DE ALIVIO DEFECTUOSA	PRESTION > 718 bar T > 105°C	FUGAS POR SELLOS, REENTRADA DE LUBRICACION	8	5	5	200	MUY ALTO	<ul style="list-style-type: none"> • PRUEBAS DE VOLUMEN DE ALIVIO (250 h) • CONTROL VISCOSIDAD (SEMANAL) • LIMPIEZA DE CONDUCTO DE ALIVIO (500h) • USO DE ACEITE SAE 40, CON CUBIERTA REPOSICION 	
FALLA EN SELLOS Y EMPAQUES	ACEITE INGRESO	INGRESO DE ACEITE	SAE INGRESO PRESTION > 718 bar T > 105°C	INGRESO DE ACEITE PRESTION PRESTION	7	6	4	168	ALTO	<ul style="list-style-type: none"> • CAMBIO DE EMPAQUES (500h) • USO DE ACEITE SAE 40, CON CUBIERTA REPOSICION DE ACEITE • CONTROL DE TEMPERATURAS CON SENSORES CALIBRADOS. Cada 250 h. • CALIBRACION DE SENSOR - CAUDALIMETRO (1000 h) 	
CAUDA / FUERZA DE FRENETOS		< 300 Ø / 450 l/min	ACEITE < 350L (CONSUMO) 918 l/h	BATA LUBRICACION SOBRECARGA MIENTRO.	9	4	4	144	ALTO	<ul style="list-style-type: none"> • VERIFICACION DE NIVEL (Cada 250h) • ANALISIS DE CONSUMO (1000h) • REVISION DE BOMBA DE ACEITE (500h) • CALIBRACION DE SENSOR - CAUDALIMETRO (1000h) 	DESARROLLO DE LA REUNION ACUERDO Y COMPROMISOS

Apéndice D. Registro fotográfico durante el desarrollo de la metodología de análisis mixto

En la **Figura D1**. Se observa el grupo Interdisciplinario durante el análisis de los componentes del sistema de propulsión.

Figura D1

Aplicación de metodología mixta - grupo Interdisciplinario



En la **Figura D2**. Se observa el grupo Interdisciplinario durante el análisis de los componentes del sistema de propulsión.

Figura D2

Aplicación de metodología mixta - grupo interdisciplinario - análisis de componentes del sistema de propulsión



En la **Figura D3**. Se observa el grupo Interdisciplinario durante el análisis de los Resultados de la encuesta de fallas recurrentes en el sistema de propulsión.

Figura D 3

Análisis de los resultados de la encuesta de fallas recurrentes en el sistema de propulsión



En la **Figura D4**. Se observa el grupo Interdisciplinario durante el análisis de causa- raíz realizado al sistema de propulsión.

Figura D 4

Grupo interdisciplinario durante el análisis de causa – raíz, realizado al sistema de propulsión



En el **Apéndice D 5**. Se observa el grupo Interdisciplinario durante la elaboración del árbol de fallas.

Apéndice D 1

Elaboración de Análisis de Causa- Raíz Realizado al Sistema de Propulsión



Apéndice E. Encuesta de frecuencia de ocurrencia de fallas en motor propulsor MTU 1163

En la **Figura E1**. Se observa el formato final de la encuesta aplicada al personal operativo seleccionado

Figura E1

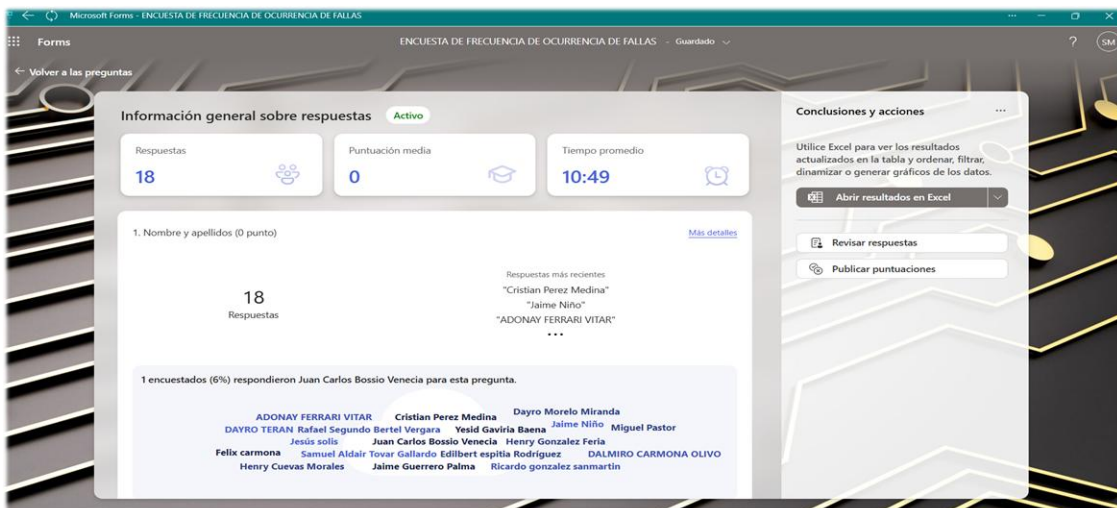
Encuesta elaborada utilizando el programa Microsoft forms



En la **Figura E2**. Se observa el personal operativo que realizo la encuesta.

Figura E2

Parte del personal que diligencio la encuesta



En la **Tabla E1**, se observan los años de experiencia del personal operativo que realizo la encuesta.

Tabla E1

Años de experiencia del personal operativo que realizo la encuesta

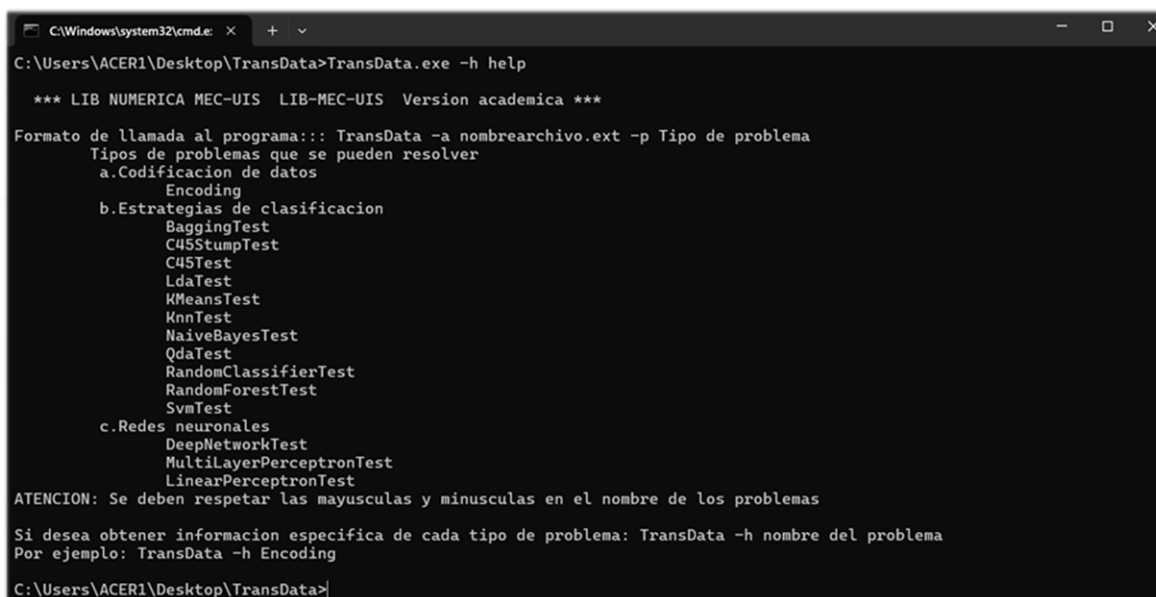
ID del participante	Nombre	Años de experiencia
1	Anónimo	27
2	Anónimo	15
3	Anónimo	19
4	Anónimo	23
5	Anónimo	10
6	Anónimo	10
7	Anónimo	5
8	Anónimo	13
9	Anónimo	15
10	Anónimo	20
11	Anónimo	10
12	Anónimo	14

Apéndice F. Aplicación utilizada en el análisis de datos- simulación “TransData”

En la **Figura F1**. Se puede observar que el programa TransData se ejecuta en el cuadro de comandos de Windows y tiene tres funciones principales, la primera es la codificación de datos, la segunda es clasificación de datos y la tercera es la de analizar datos mediante redes neuronales.

Figura F1

Programa TransData, sección de ayuda



```
C:\Windows\system32\cmd.e x + v
C:\Users\ACER1\Desktop\TransData>TransData.exe -h help

*** LIB NUMERICA MEC-UIS LIB-MEC-UIS Version academica ***

Formato de llamada al programa:: TransData -a nombearchivo.ext -p Tipo de problema
Tipos de problemas que se pueden resolver
a.Codificacion de datos
  Encoding
b.Estrategias de clasificacion
  BaggingTest
  C45StumpTest
  C45Test
  LdaTest
  KMeansTest
  KnnTest
  NaiveBayesTest
  QdaTest
  RandomClassifierTest
  RandomForestTest
  SvmTest
c.Redes neuronales
  DeepNetworkTest
  MultiLayerPerceptronTest
  LinearPerceptronTest

ATENCIÓN: Se deben respetar las mayúsculas y minúsculas en el nombre de los problemas

Si desea obtener información específica de cada tipo de problema: TransData -h nombre del problema
Por ejemplo: TransData -h Encoding

C:\Users\ACER1\Desktop\TransData>
```

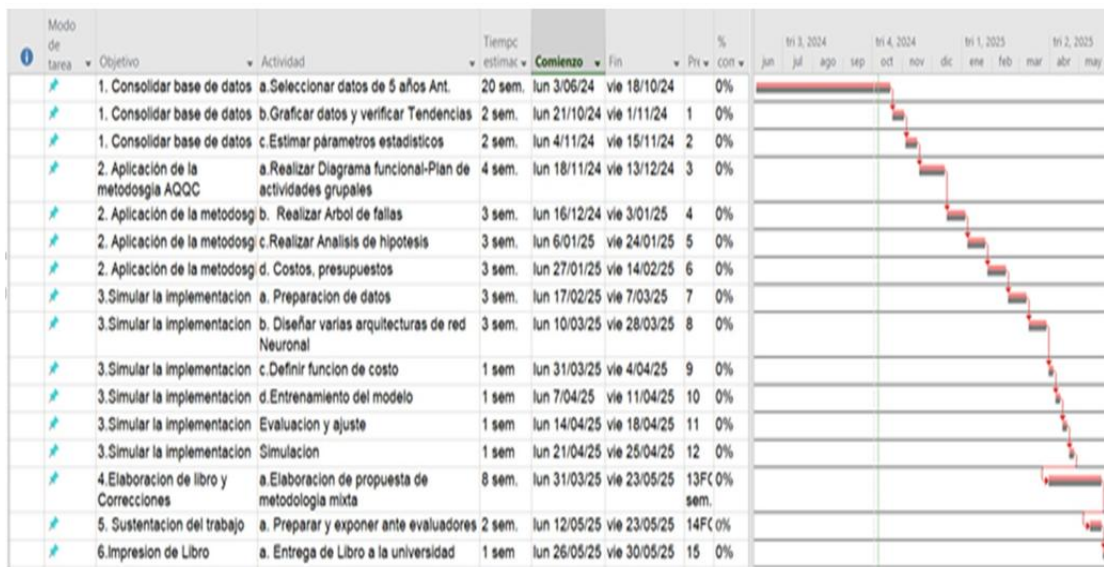
Nota. Captura de pantalla del software de análisis de datos “TransData”, desarrollado por el Ing. David Fuentes (2025) para temas académicos.

Apéndice G. Cronograma de actividades para la ejecución de la metodología mixta y presupuesto

En la **Figura G1**. Se observa la planeación de actividades que se llevaron a cabo durante la metodología mixta AQQC.

Figura G1

Cronograma de actividades de metodología mixta AQQC



En la **Tabla G2**. Se observa presupuesto de los costos planeados de cada actividad que se llevó a cabo durante la metodología mixta AQQC.

Tabla G1*Presupuesto de metodología mixta AQQC*

Nro	Objetivo	Actividad	Tiempo estimado (Sem)	Hsem	Pesos x Hora	HH	Equipos	Licencias	Papelería	Materiales	Transporte
1	Consolidar base de datos	Selección datos de 5 años Ant.	4	15	100000	6000000	4000000	1500000	3000000	3000000	3000000
1	Consolidar base de datos	Graficar datos y verificar tendencias	2	15	100000	3000000					
1	Consolidar base de datos	Estimar parámetros estadísticos	2	15	100000	3000000					
2	Aplicación metodología AQQC	Realizar diagrama funcional	4	60	100000	24000000	16000000	6000000			
2	Aplicación metodología AQQC	Realizar árbol de fallas	3	15	100000	4500000					
2	Aplicación metodología AQQC	Realizar análisis de hipótesis	3	15	100000	4500000					
2	Aplicación metodología AQQC	Costos y presupuestos	3	15	100000	4500000					
3	Simular implementación	Preparación de datos	3	15	100000	4500000					
3	Simular implementación	Diseño de arquitectura red neuronal	3	15	100000	4500000					
3	Simular implementación	Definición función de costo	1	15	100000	1500000					
3	Simular implementación	Entrenamiento del modelo	1	15	100000	1500000					
3	Simular implementación	Evaluación y ajuste	1	15	100000	1500000					
3	Simular implementación	Simulación	1	15	100000	1500000					
4	Elaboración libro y corrección	Elaboración propuesta metodología	8	15	100000	12000000					
5	Sustentación trabajo de grado	Preparar y exponer ante evaluadores	2	15	100000	3000000					
6	Impresión del libro	Entrega del libro a la universidad	1	15	100000	1500000					
TOTAL						81000000	20000000	7500000	3000000	3000000	3000000