

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE CONCEPCIÓN REY BALDUINO DE BELGICA

PLAN DE MANTENIMIENTO A CABRESTANTE HIDRÁULICO DE BUQUE
MERCANTE

Trabajo de titulación para optar al título
profesional de ingeniero en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Nombre del alumno
Sebastián Avendaño Pizarro

Nombre profesor guía.
Juan José Figueroa

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Plan de mantenimiento a cabrestante hidráulico de buque mercante

Nombre del candidato(a): Sebastián Antonio Avendaño Pizarro

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Concepcion ; Departamento: Mecanica Industrial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Juan Jose Figueroa Cohn, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 06-03-26

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06-03-26

; Firma:

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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, de manera muy especial, a mi padrino y tío Daniel, quien hoy descansa en paz. Aunque partió de forma injusta en el año 2023, su presencia sigue viva en cada paso que doy. En vida lo dio todo por mí, me cuidó, me formó y me guio como un verdadero padre, forjando en mí los valores que hoy me definen como persona y como hombre. Su ejemplo de esfuerzo, honestidad y sacrificio ha sido una guía constante en mi camino, y este logro es también suyo.

Con el mismo cariño y gratitud, dedico esta tesis a mi abuelo, a quien siempre llamé “Papi Pizarro”, quien también hoy descansa en paz. Su apoyo, sus enseñanzas y su constante preocupación por mi bienestar marcaron profundamente mi vida, y su recuerdo permanece como un pilar fundamental en mi formación personal.

Esta dedicatoria se extiende con profundo cariño a mi madrina Estrella, mi tía, por su apoyo incondicional, su fortaleza y su compañía permanente, incluso en los momentos más difíciles.

A mis padres, y muy especialmente a mi madre, por su amor, paciencia y respaldo inquebrantable a lo largo de toda mi vida y de este proceso académico. A mi hermana, por su cariño y apoyo constante. Y a mi hija Emilia, mi mayor motivación, quien con tan solo seis años le da sentido a cada esfuerzo y me impulsa a seguir adelante.

Gracias a todos por estar presentes en las buenas y en las malas, por creer en mí y acompañarme en este camino. En especial, gracias a ti, padrino, porque sé que desde donde estés me cuidas, me proteges y te sientes orgulloso de este logro que también nació de lo que tú sembraste en mí.

RESUMEN

Los cabrestantes hidráulicos son equipos esenciales en los buques mercantes, ya que cumplen funciones críticas en operaciones de fondeo, amarre y manipulación de cargas pesadas. Su correcto funcionamiento es indispensable para garantizar la seguridad, eficiencia y disponibilidad operativa durante maniobras marítimas, tanto en puerto como en navegación.

En el fondeo de anclas, los cabrestantes permiten desplegar y recuperar la cadena de forma controlada, complementando el trabajo del molinete y asegurando un fondeo seguro. En el amarre y atraque, ajustan la tensión de las líneas, facilitando el posicionamiento preciso del buque en muelles y evitando desplazamientos por acción del viento o las corrientes. Además, en operaciones portuarias, contribuyen a la carga y descarga de mercancías, gracias a su capacidad de elevación y control preciso.

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un plan de mantenimiento preventivo–predictivo con mejora de diseño para el cabrestante hidráulico de anclaje de un buque mercante, abordando específicamente la mejora de sus pedestales. Actualmente, estos componentes utilizan bocinas de bronce que presentan desgaste acelerado y limitaciones frente a las exigencias operativas y ambientales del entorno marino. Por ello, se propone su reemplazo por cojinetes poliméricos de alto rendimiento, capaces de soportar fricción, cargas radiales y axiales, y resistir la corrosión provocada por el agua de mar.

La implementación de esta mejora busca extender la vida útil del sistema, reducir los costos de mantenimiento y aumentar la disponibilidad operativa del cabrestante, contribuyendo así a una gestión más eficiente y segura de los equipos a bordo.

ÍNDICE

DEDICATORIA 8

RESUMEN.....9

ÍNDICE 10

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA 12

INTRODUCCIÓN 13

OBJETIVOS 14

 OBJETIVO GENERAL 14

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....14

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO 15

 1.1 MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....16

 1.1.1 HISTORIA MANTENIMIENTO 16

 1.1.2 Tipos de mantenimiento 20

 1.1.3 Técnicas de análisis de fallas 22

 1.2 Cabrestante.....26

 1.2.1 Historia del cabrestante marino.....27

 1.2.2 Tipos de cabrestantes 28

CAPÍTULO 2: SITUACIÓN ACTUAL 44

 2. Planteamiento del problema.....45

 2.1 Cabrestante hidráulico de anclaje.....46

 2.2 PARTES DEL CABRESTANTE 49

 2.3 Sistemas del cabrestante.....53

 2.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CABRESTANTE HIDRÁULICO 55

 DE ANCLAJE.....55

 2.5 USO DEL CABRESTANTE 58

 2.6 DURACIÓN DE LA MANIOBRA DE FONDEO.....58

 2.7 EL OVERHAUL.....60

 2.8 DATOS 69

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA.....79

 3. PROPUESTA DE MEJORA 80

3.1	Diagnóstico del esquema actual y necesidad de mejora	80
3.2	INCORPORACIÓN DE LA MEJORA EN LOS BUJES DE LOS PEDESTALES	81
3.3	ANÁLISIS DE CARGAS Y VALIDACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS BOCINAS DEL PEDESTAL	85
3.4	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LA MEJORA PROPUESTA	90
3.5	PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA MEJORA	91
3.6	Checklist de plan de mantenimiento en asmar	91
3.6.1	Checklist de plan de mantenimiento de la tripulación	95
3.7	ANÁLISIS DE RIESGOS ASOCIADOS A LA MEJORA	97
3.8	Evaluación del desempeño técnico–operacional del cabrestante.....	98
3.8.1	Criterio de evaluación adoptado	98
3.8.2	Componente crítico y modo de falla dominante	98
3.8.3	Evaluación del desempeño técnico–operacional actual	98
3.8.4	Carga de mantenimiento planificado	99
3.8.5	Síntesis del desempeño del cabrestante.....	99
3.8.6	Evaluación comparativa del desempeño operacional del cabrestante.....	100
3.9	ESCALABILIDAD DE LA MEJORA PROPUESTA	101
3.10	SÍNTESIS DE LA PROPUESTA DE MEJORA.....	101
CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA		103
4.1	Objetivo de la evaluación económica	104
4.2	Condiciones operativas reales y supuestos del análisis.....	104
4.3	Costos de materiales.....	105
4.4	Costos incrementales asociados al recambio de bocinas	105
4.5	Escenario actual: bocinas de bronce	107
4.6	Escenario propuesto: bocinas Thordon ThorPlas-Blue.....	107
4.7	Comparación económica incremental (20 años).....	108
4.8	Impacto operativo y ahorro por reducción de engrase y monitoreo.....	108
4.9	Evaluación económica integral de la mejora	109
4.10	Conclusión de la evaluación económica	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		111
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN		113

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

H/H	:	Hora/hombre
IMC	:	Instituto Marítimo de Chile
Ishikawa	:	Diagrama de Causa-Efecto
Camport	:	Cámara Marítima y Portuaria de Chile
DIRECTEMAR	:	Dirección General del territorio marítimo y de marina mercante de Chile
BB	:	Babor (Lado izquierdo del barco)
EB	:	Estribor (Lado derecho del barco)

SIMBOLOGÍA

\$	:	Símbolo de moneda (dólares)
Nº	:	Número
h	:	Horas (unidad de tiempo)
kg	:	Kilogramo
kN	:	Kilo newton
m/min	:	Metro/Minuto
Nm	:	Newton metro
Bar	:	Unidad de presión
l/min	:	Litros/Minuto
l/rev	:	Litros/revolución
mm	:	Milímetro

INTRODUCCIÓN

El cabrestante o winche marino constituye un equipo esencial en la operación de los buques, ya que permite levantar, arrastrar y controlar cargas pesadas mediante sistemas eléctricos, hidráulicos o mecánicos. Su funcionamiento, basado en el uso de cables, cadenas o cuerdas, resulta indispensable en maniobras críticas como el fondeo de anclas, el cobro de cabos, el amarre en muelles y el remolque de embarcaciones auxiliares.

La importancia de este dispositivo radica en que garantiza la seguridad, eficiencia y continuidad operativa durante las maniobras de fondeo y atraque, tanto en puertos como en zonas de fondeo en mar abierto. En la mayoría de las embarcaciones, el cabrestante de anclaje opera de manera intensiva y bajo condiciones ambientales exigentes, lo que convierte su fiabilidad y rendimiento continuo en un factor determinante para el éxito de las operaciones marítimas.

Un cabrestante en condiciones deficientes no solo puede provocar retrasos operativos y pérdidas económicas, sino que también representa un riesgo para la seguridad de la tripulación y la integridad del buque. Por ello, la implementación de estrategias de mantenimiento adecuadas es fundamental para garantizar su disponibilidad y prolongar su vida útil.

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar un plan de mantenimiento para el cabrestante hidráulico de anclaje, orientado a optimizar su funcionamiento, reducir la probabilidad de fallas imprevistas y mejorar la eficiencia operativa. Con ello, se busca contribuir a la seguridad, productividad y sostenibilidad de las operaciones marítimas, alineando la gestión de activos con las exigencias actuales de la industria naval.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Generar un plan de mantenimiento para los cabrestantes de un buque mercante, incorporando la mejora de los descansos (pedestales).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir los componentes principales y el funcionamiento del cabrestante hidráulico de anclaje, con énfasis en los pedestales y el sistema de bocinas.
2. Diagnosticar las fallas presentes en el cabrestante mediante técnicas de análisis de fallas, evaluando el desgaste y desempeño de las bocinas de bronce.
3. Diseñar la mejora de los descansos (pedestales) mediante la sustitución de bocinas de bronce por cojinetes poliméricos, seleccionando materiales adecuados para condiciones marinas y cargas operativas.
4. Desarrollar un plan de mantenimiento técnico-económico que incorpore la mejora propuesta, estimando los costos de implementación y su impacto en la disponibilidad operativa del sistema.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones técnicas y administrativas necesarias para conservar o restablecer un ítem a un estado en el que pueda cumplir la función requerida. Su objetivo principal es asegurar la máxima disponibilidad, confiabilidad y vida útil de los activos, optimizando los recursos y garantizando la seguridad operacional.

En términos de gestión de activos, el mantenimiento busca el control constante de las instalaciones y/o componentes, abarcando desde inspecciones rutinarias hasta complejos trabajos de reparación y revisión, indispensables para sostener la integridad operativa de un sistema.

1.1.1 HISTORIA MANTENIMIENTO

El mantenimiento de maquinaria comenzó a adquirir relevancia económica a partir de la Revolución Industrial (finales del siglo XVIII y comienzos del XIX), cuando las fábricas empezaron a depender de equipos mecánicos para sostener la producción. Antes de esta época, la mayor parte del trabajo recaía en la mano de obra, y las máquinas eran escasas y simples, por lo que no existía una disciplina formal de mantenimiento.

- Primera generación: Mantenimiento correctivo (siglo XIX – primera mitad del XX)
 1. Se caracterizó por la reparación tras la falla: las máquinas se atendían únicamente cuando se averiaban.
 2. Esto implicaba paradas imprevistas y pérdidas de producción, pero era aceptable porque los equipos eran relativamente simples, robustos y fáciles de reparar.

3. No existían planes de mantenimiento ni rutinas programadas; la preocupación surgía solo cuando ocurría la avería.

Durante la Revolución Industrial, la introducción de maquinaria textil, locomotoras y motores a vapor generó la necesidad de preservar los equipos. Sin embargo, el mantenimiento se limitaba a la reparación tras la avería, lo que implicaba paradas frecuentes y pérdidas de producción (Mobley, 2002).

En esta etapa, los equipos eran robustos y relativamente simples, por lo que la reparación era directa, aunque no existía planificación ni registros sistemáticos.

- Segunda generación: Mantenimiento preventivo (mediados del siglo XX)
 1. Con la producción en masa y la consolidación de la línea de montaje (impulsada por la industria automotriz), la fiabilidad de los equipos se volvió crítica.
 2. Durante la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de mantener operativos aviones, barcos y tanques aceleró el desarrollo de programas de mantenimiento preventivo.
 3. El objetivo era extender la vida útil de los activos y reducir el riesgo de fallas catastróficas que podían generar pérdidas económicas o estratégicas.
 4. Se introdujeron rutinas programadas de inspección, lubricación y sustitución de piezas antes de que fallaran.

Con la consolidación de la producción en masa y la influencia de la Segunda Guerra Mundial, la fiabilidad de los equipos se volvió crítica. La industria automotriz y militar impulsaron la implementación de rutinas programadas de inspección, lubricación y sustitución de piezas (Kelly, 2006).

El objetivo era extender la vida útil de los activos y reducir fallas inesperadas. Sin embargo, este enfoque generaba altos costos, ya que muchas intervenciones se realizaban sin considerar el estado real de los equipos.

- Tercera generación: Mantenimiento predictivo y basado en condición (décadas de 1960–1970)
 1. El mantenimiento evolucionó hacia una combinación de preventivo y correctivo, pero con un enfoque más técnico.
 2. Se empezaron a aplicar técnicas de diagnóstico como el análisis de vibraciones, ultrasonido y termografía, lo que permitió anticipar fallas.

3. Apareció el concepto de mantenimiento a condición, donde las intervenciones se realizaban en función del estado real del equipo y no solo por calendario.
4. Esto redujo costos, optimizó recursos y exigió personal más especializado capaz de interpretar datos de sensores y generar tendencias históricas del comportamiento de las máquinas.
5. prevención y la corrección, donde las actividades de fondo se consideran de menor importancia y útil solo cuando se producía una falla o avería.

El desarrollo de la instrumentación y la electrónica permitió la aplicación de técnicas de diagnóstico como el análisis de vibraciones, termografía y ultrasonido. Esto dio origen al mantenimiento basado en condición, donde las intervenciones se realizan en función del estado real del equipo (Alsyouf, 2007).

Este enfoque redujo costos y optimizó recursos, aunque exigió personal más especializado capaz de interpretar datos y generar tendencias históricas del comportamiento de las máquinas.

- Cuarta generación: Mantenimiento productivo total (TPM) y digitalización (desde 1970 en adelante)
 1. Inspirado en la filosofía japonesa, surge el Total Productive Maintenance (TPM), que integra mantenimiento, calidad y productividad.
 2. Introduce el mantenimiento autónomo, donde los operarios son capacitados para realizar tareas básicas de cuidado y monitoreo de sus equipos.
 3. La automatización y los sistemas de control facilitaron la lectura de indicadores y la implicación directa de los trabajadores en la fiabilidad de los activos.
 4. Desde los años 80, la revolución informática transformó la gestión industrial: aparecieron los CMMS (Computerized Maintenance Management Systems), software especializado para planificar, registrar y optimizar el mantenimiento.
 5. Hoy en día, la tendencia apunta hacia el mantenimiento 4.0, con el uso de inteligencia artificial, big data e IoT para predecir fallas con mayor precisión y maximizar la disponibilidad de los equipos.

Inspirado en la filosofía japonesa de la calidad total, surge el Total Productive Maintenance (TPM), que integra mantenimiento, calidad y productividad (Nakajima, 1988).

El TPM introdujo el mantenimiento autónomo, capacitando a los operarios para realizar tareas básicas de cuidado y monitoreo. Paralelamente, la revolución informática permitió la aparición de los CMMS (Computerized Maintenance Management Systems), que facilitaron la planificación y registro de actividades (Tsang, 2002)

- Quinta generación: Mantenimiento 4.0 (2000 – actualidad)

Contexto histórico: La revolución digital y la Industria 4.0 transforman la gestión de activos.

1. Características:

- Uso de sensores IoT, big data, inteligencia artificial y machine learning para predecir fallas con alta precisión.
- Integración con sistemas de gestión empresarial (ERP, MES).
- Concepto de mantenimiento prescriptivo, que no solo predice la falla, sino que recomienda la acción óptima.

2. Impacto:

- Reducción drástica de paradas no planificadas.
- Optimización de costos y recursos.
- Contribución a la sostenibilidad mediante eficiencia energética y reducción de desperdicios.

Conclusión:

La evolución del mantenimiento refleja la transición de una actividad reactiva a una disciplina estratégica y digitalizada. Hoy en día, el mantenimiento no solo busca preservar la disponibilidad de los equipos, sino también maximizar la productividad, garantizar la seguridad y apoyar la sostenibilidad empresarial. En este sentido, el mantenimiento industrial se ha convertido en un factor clave de competitividad en mercados globalizados y altamente exigentes.

1.1.2 Tipos de mantenimiento

Estrategias de mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial puede clasificarse en distintas estrategias según el momento y la forma en que se intervienen los equipos. A continuación, se presentan las principales modalidades, con sus ventajas y desventajas.

1. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo consiste en reparar un equipo únicamente después de que se ha producido la avería. Se trata de una estrategia reactiva, que puede generar pérdidas de tiempo y dinero debido a la detención no planificada de la producción. No obstante, en ciertos casos resulta la opción más adecuada, especialmente cuando la reparación es sencilla, económica y no compromete la seguridad ni la continuidad del proceso.

a) Ventajas:

- Estrategia simple y de fácil implementación.
- Adecuada para equipos de bajo costo o baja criticidad.
- Útil en fallas menores que no afectan significativamente la producción.
- Puede ser más económica en activos no críticos.
- Respuesta rápida en situaciones de emergencia.

b) Desventajas:

- Genera tiempos de inactividad imprevistos.
- Puede implicar costos elevados en reparaciones mayores.
- Riesgo de pérdida de calidad en el producto o servicio.
- Aumenta la probabilidad de incidentes de seguridad.
- No es adecuada para equipos críticos en procesos continuos.

2. Mantenimiento preventivo

Esta estrategia se centra en realizar inspecciones, limpiezas, lubricaciones y ajustes programados para evitar que se produzcan fallas en los equipos.

a) Ventajas:

- Reduce el riesgo de averías
- Minimiza los tiempos de paradas
- Optimiza la vida útil de los equipos

b) Desventajas

- Costo inicial
- Más mano de obra
- Personal capacitado para interpretar datos

3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es un enfoque proactivo que utiliza datos de operación, sensores y registros históricos para predecir fallas potenciales. Se basa en el análisis de tendencias y patrones que permiten anticipar el momento óptimo para intervenir un equipo.

a) Ventajas:

- Reduce los tiempos de parada al intervenir solo cuando es necesario.
- Optimiza los costos de mantenimiento al evitar reemplazos prematuros.
- Mejora la seguridad al detectar fallas incipientes.
- Prolonga la vida útil de los equipos críticos.
- Permite una gestión más eficiente de repuestos y recursos.

b) Desventajas:

- Requiere una inversión elevada en instrumentación y sistemas de monitoreo.
- Necesidad de personal altamente capacitado en análisis de datos.
- Puede generar sobrecarga de información si no se gestiona adecuadamente.
- No siempre es aplicable a todos los equipos, especialmente los de baja criticidad.

4. Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo busca eliminar las causas raíz de las fallas antes de que estas ocurran. Se centra en la mejora continua, el rediseño de componentes y la optimización de condiciones de operación, con el objetivo de reducir el tiempo de inactividad no planificado y aumentar la confiabilidad global del sistema.

a) Ventajas:

- Incrementa la durabilidad y confiabilidad de los equipos.
- Reduce significativamente los tiempos de parada.
- Mejora la eficiencia operativa y la disponibilidad de los activos.
- Contribuye a la seguridad y sostenibilidad de los procesos.

b) Desventajas:

- Requiere inversión adicional en instrumentación y rediseño.
- Alta dependencia de la tecnología y del análisis de datos.
- No es aplicable a todos los equipos, especialmente los de bajo valor o baja criticidad.
- Demanda una cultura organizacional orientada a la mejora continua.

1.1.3 Técnicas de análisis de fallas

Este apartado presenta y mejora tres técnicas clave para el análisis de fallas en cabrestantes hidráulicos: Principio de Pareto, Diagrama de Ishikawa y Análisis de Causa Raíz (ACR). Cada técnica incluye descripción, pasos aplicados, métricas, herramientas y su aplicación práctica al caso de bocinas y pedestales en ambiente marino.

1. Principio de Pareto

Descripción El Principio de Pareto o regla 80/20 establece que una minoría de causas genera la mayor parte de los efectos. En mantenimiento, permite focalizar esfuerzos sobre las pocas causas que concentran la mayoría de las fallas, tiempos de paro o costos.

Pasos aplicados

1. Recolectar datos históricos del CMMS por un período representativo (ideal 3–5 años): componente, fecha, horas de paro, costo, modo de falla.
2. Definir la métrica principal: horas de indisponibilidad, costo acumulado o número de eventos.
3. Agrupar fallas por categoría operativa o componente (bocinas, bombas, sellos, válvulas, mangueras, acoplamientos).
4. Calcular totales y porcentaje acumulado por categoría.
5. Construir gráfico Pareto (barras + curva acumulada).
6. Priorizar acciones en las categorías que sumen el 60–80% del efecto.

Métricas y umbrales orientativos

- Priorizar categorías con $\geq 60\%$ de la indisponibilidad o costo.
- Revisar Pareto tras cada intervención quinquenal para validar impacto.

Herramientas

- CMMS; hojas de cálculo para gráficos; informe de tendencias.

Aplicación al cabrestante Métrica recomendada: horas de indisponibilidad por componente y costo asociado. Resultado esperado: confirmar si bocinas/pedestales concentran la mayor parte del tiempo muerto y justificar intervención polimérica.

2. Diagrama de Ishikawa Causa Efecto

Descripción: Herramienta visual que desglosa sistemáticamente las posibles causas de un problema central en ramas principales, facilitando identificar orígenes y generar hipótesis verificables.

Cómo construirlo aplicado

1. Definir el problema central en la cabeza del diagrama (ej. “Desgaste prematuro de bocinas en pedestales”).
2. Seleccionar categorías (6M): Método, Maquinaria, Mano de obra, Materiales, Medición, Medio ambiente.
3. Realizar brainstorming multidisciplinario y documentar evidencia para cada causa.
4. Dibujar ramas y subramas con causas específicas.
5. Priorizar causas usando criterios cuantitativos (frecuencia, impacto) o una matriz de criticidad.

6. Definir acciones correctivas, responsables y plazos; planificar verificación.

Ventajas

- Estructura el pensamiento en equipos multidisciplinarios.
- Visualiza relaciones y desglose fino de causas.
- Facilita la generación de hipótesis comprobables y planes de acción.

Desventajas y riesgos

- Interpretación puede ser subjetiva si falta evidencia.
- Requiere participación y tiempo del personal clave.
- Puede centrarse en factores aislados sin priorización basada en datos.

Aplicación al cabrestante Categorías y ejemplos:

- Método: procedimientos de montaje o lubricación deficientes.
- Maquinaria: desalineación de eje, holguras en pedestales.
- Mano de obra: montaje incorrecto, falta de capacitación.
- Materiales: bocinas de bronce no aptas para agua salada o cargas combinadas.
- Medición: ausencia de monitoreo de temperatura, vibración o desgaste.
- Medio ambiente: salitre, abrasivos portuarios. Resultado esperado: identificar causas raíz operativas y de diseño que orienten el reemplazo por polímero y la actualización de procedimientos.

3. Análisis de Causa Raíz ACR

Descripción: El ACR busca determinar la causa fundamental que origina una falla, evitando soluciones superficiales. Utiliza métodos como 5 Porqués, Fault Tree y verificación mediante datos e ensayos.

Métodos y cuándo usarlos:

- 5 porque: para fallas simples o cuando hay evidencia clara.
- Fault Tree Analysis (FTA): para fallas complejas o críticas con múltiples eventos contribuyentes.

- RCA estructurado: combinación de EVIDENCIA → HIPÓTESIS → VERIFICACIÓN → ACCIÓN.

Protocolo aplicado

1. Reunir evidencia cuantitativa y cualitativa: registros CMMS, análisis de aceite, termografías, vibraciones, mediciones dimensionales, fotos y reportes de inspección.
2. Convocar taller multidisciplinario (operadores, mecánica, hidráulica, ingeniería naval).
3. Aplicar 5 Porqués para modos simples; construir Fault Tree para modos complejos.
4. Verificar causa raíz con pruebas (boroscopia, END, ensayos bajo carga).
5. Definir contramedidas específicas, responsables, plazos y criterios de verificación.
6. Implementar acciones y monitorizar resultados; registrar en CMMS y recalcular Pareto y RPN.

Ejemplo práctico 5 Porque

- Problema: bocina con desgaste prematuro.
 1. ¿Por qué? Porque hay partículas abrasivas entre eje y bocina.
 2. ¿Por qué? Porque el aceite contiene sólidos y agua.
 3. ¿Por qué? Porque el sistema de filtración no retiene partículas finas.
 4. ¿Por qué? Porque el mantenimiento del filtro no se cumple.
 5. ¿Por qué? Porque no hay control documental ni alarmas de contaminación. Causa raíz: gestión de filtración y procedimientos deficientes. Acción: mejora de filtración, muestreo periódico de aceite e inclusión de alarmas ISO.

Criterios de verificación

- Ensayo funcional bajo carga sin recurrencia de la falla en un horizonte temporal acordado (ej. 12 meses).
- Reducción del RPN en FMECA y disminución del aporte en Pareto.

Integración práctica entre Pareto, Ishikawa y ACR

1. Ejecutar Pareto sobre el historial para priorizar componentes críticos.
2. Para las categorías prioritarias, realizar taller de Ishikawa para generar hipótesis de causas.
3. Aplicar ACR (5 Porqués o FTA) sobre las hipótesis principales hasta confirmar la causa raíz.

4. Implementar acciones de diseño (ej. bocina polimérica), procedimiento y control de condición.
5. Verificar mediante ensayos y actualizar CMMS; repetir Pareto para medir efecto.

Métricas, herramientas y buenas prácticas

Métricas clave

- MTBF, MTTR, horas de indisponibilidad, costo por falla, frecuencia por componente, RPN.
- Indicadores de condición: vibración (mm/s RMS), temperatura superficial (ΔT sobre referencia).
- CMMS; hojas de cálculo; software para FTA; equipo de termografía, vibración, ultrasonido; boroscopio; kits de muestreo de aceite.

Buenas prácticas

- Asegurar calidad de datos antes de Pareto.
- Incluir siempre verificación empírica en ACR antes de cambios de diseño costosos.
- Registrar todas las decisiones y resultados en CMMS para cerrar el ciclo de mejora.
- Recalibrar prioridades con Pareto tras cada intervención quinquenal.

Conclusión Combinar Pareto, Ishikawa y ACR ofrece un flujo robusto: Pareto decide dónde actuar, Ishikawa genera hipótesis estructuradas, y ACR valida la causa raíz y prescribe contramedidas verificables para evitar recurrencias en bocinas y pedestales de cabrestantes.

Adicionalmente, se realizará una mejora al pedestal (descansos) implementando una bocina Thordon ThorPlas-Blue, siempre que sea la opción más eficiente.

1.2 CABRESTANTE

Un cabrestante marino (winch) es un equipo mecánico diseñado para enrollar o desenrollar una cuerda, cable o cadena alrededor de un tambor con el fin de izar, arrastrar, tensar o posicionar cargas pesadas a bordo de una embarcación. Puede accionarse manualmente o mediante motores

eléctricos, hidráulicos o de combustión, y en aplicaciones navales suele integrarse con sistemas de transmisión, frenos y controles que permiten operaciones seguras y precisas en maniobras de fondeo, amarre y manipulación de carga.

1.2.1 Historia del cabrestante marino

Orígenes antiguos: las raíces del cabrestante se remontan a dispositivos basados en torno y poleas usados desde la antigüedad para izar pesos en construcción y en barcos; estos mecanismos permitían multiplicar la fuerza humana mediante palancas, rodillos y aparejos de cuerda.

- Edad Media y época de vela: en embarcaciones tradicionales se usaban tambores y ruedas accionadas por mano o por animales para manejar anclas, velas y aparejos; fueron los precursores del cabrestante moderno, con diseños de madera y accionamiento manual por varios tripulantes.
- Revolución Industrial: la incorporación de sistemas de engranajes y máquinas a vapor transformó el cabrestante, permitiendo fuerzas mucho mayores y operaciones menos dependientes de la fuerza humana; esto facilitó el manejo de cadenas y anclas en buques más grandes y en puertos industriales.
- Siglos XX y XXI: la electrificación y el desarrollo de sistemas hidráulicos llevaron a cabrestantes más compactos, potentes y controlables; la electrónica y los controles automáticos añadieron seguridad y precisión, mientras que los avances en materiales (metales de alta resistencia, polímeros y compuestos) mejoraron la durabilidad y redujeron el mantenimiento.
- Estado actual: en la actualidad existen cabrestantes diseñados específicamente para aplicaciones marítimas con criterios de clase y normativa, variantes eléctricas e hidráulicas, sistemas de control electrónico y opciones de materiales para cojinetes y bocinas que mejoran la resistencia a la corrosión y al desgaste en ambientes marinos.

Aplicación práctica y relevancia técnica para tu proyecto: los cabrestantes modernos combinan sistemas mecánicos, hidráulicos y de control; sus componentes críticos (pedestales, bocinas, ejes, frenos y bombas) están expuestos a cargas dinámicas, corrosión por agua de mar y contaminación abrasiva, por lo que el análisis de fallas y la selección de materiales adecuados (por ejemplo, cojinetes poliméricos certificados para uso marino) son esenciales para aumentar la disponibilidad operativa y reducir costos de mantenimiento.

1.2.2 Tipos de cabrestantes

Los cabrestantes marinos (winches) son equipos esenciales a bordo de los buques, su clasificación depende del tipo de energía que los acciona, el control, la disposición estructural y la función que cumplen dentro del barco.

➤ Tipos de control

1. **Control manual**

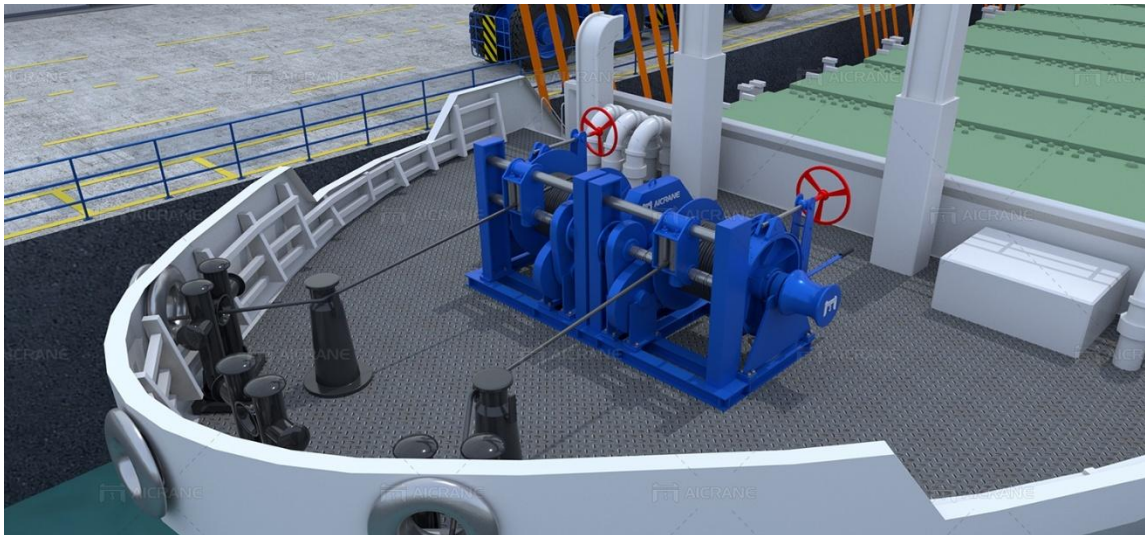


Ilustración 1-1.- Control Manual

Fuente: Internet

- Accionado directamente por fuerza humana mediante manivelas o palancas.
- Se utiliza en embarcaciones pequeñas.
- Bajo costo y mantenimiento sencillo.

2. **Control eléctrico**



Ilustración 1-2.- Control eléctrico

Fuente: Internet

- Utiliza un **motor eléctrico** conectado a un tambor y un sistema reductor.
- Común en **yates, pesqueros medianos y barcos de apoyo portuario**.
- Permite control mediante botonera local o consola remota.

3. **Control hidráulico**



Ilustración 1-3.- Control Hidráulico

Fuente: Internet

- El más usado en buques mercantes, graneleros y remolcadores.
- Funciona con presión de aceite generada por una bomba hidráulica, lo que ofrece mayor fuerza y control de velocidad.
- Ideal para operaciones de fondeo, amarre o remolque pesado

➤ Tipo de accionamiento

Los cabrestantes pueden ser accionados por diferentes mecanismos de energía, ya sea eléctrico, hidráulico.



Ilustración 1-4.- Motor Eléctrico

Fuente: Internet



Ilustración 1-5.- Motor Hidráulico

Fuente: Internet

➤ Tipos de cabrestante por sus tambores



Ilustración 1-6.- Cabrestante de dos tambores

Fuente: Internet



Ilustración 1-7.- Cabrestante de dos tambores

Fuente: Elaboración propia

Tipo de cabrestante	Nº de tambores	Elementos principales	Uso principal	Imagen de referencia
De ancla (solo wildcat)	0	Wildcat + freno	Fondeo de ancla	
De amarre simple	1	Tambor + freno	Amarre o tiro	

Tipo de cabrestante	Nº de tambores	Elementos principales	Uso principal	Imagen de referencia
Combinado (ancla y amarre)	2	Wildcat + 2 tambores	Fondeo y amarre	

Tabla 1-1. - Tipos de cabrestantes

➤ Tipos de frenos

Tipo de freno	Energía de accionamiento	Función principal	Aplicación típica
Freno de banda	Manual o hidráulico	Freno principal o de emergencia	Cabrestantes de ancla tradicionales
Freno de disco	Hidráulico / neumático	Freno principal controlado	Cabrestantes modernos y remolcadores
Freno de tambor	Eléctrico / hidráulico	Freno de retención	Winches eléctricos

Tipo de freno	Energía de accionamiento	Función principal	Aplicación típica
Freno de cuña o trinquete	Mecánico	Freno de seguridad	Sistemas de fondeo
Freno dinámico	Eléctrico / electrónico	Control de velocidad	Winches eléctricos modernos

Tabla 1-2.- Tipos de frenos

1.2.3 Partes del cabrestante

✓ Vista general del cabrestante

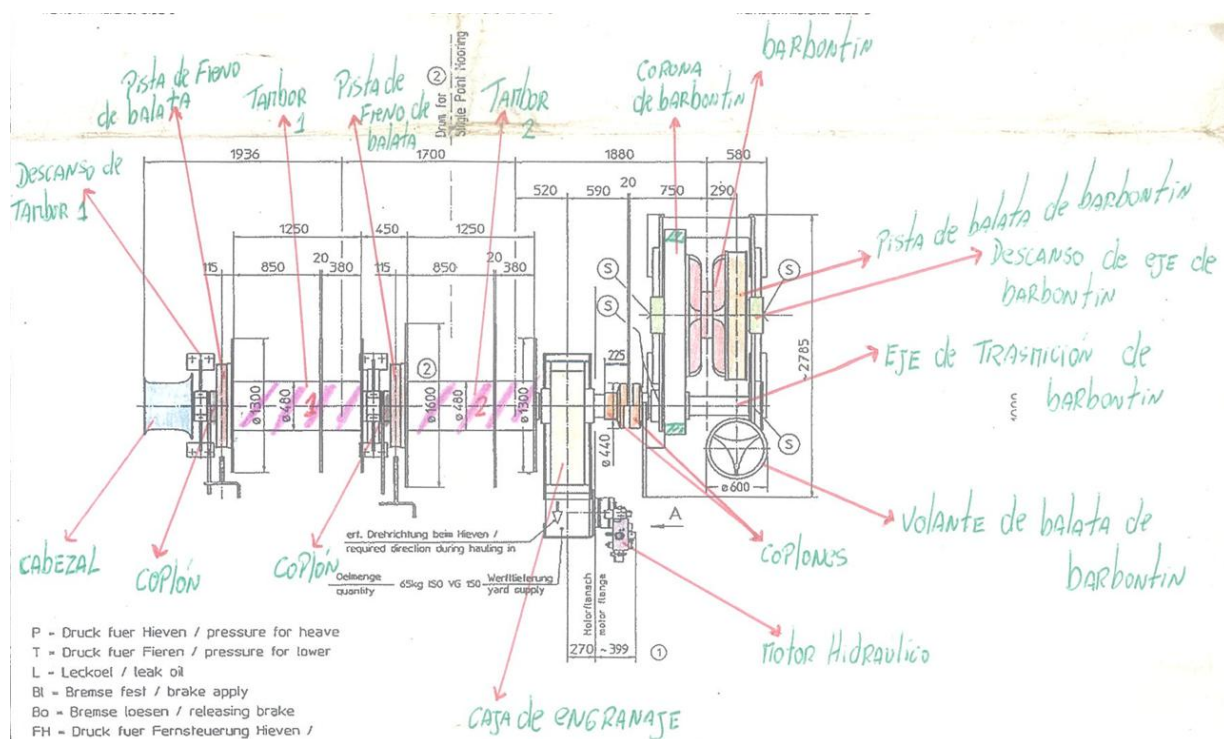


Ilustración 1-8.- Vista en plano

Fuente: Elaboración propia

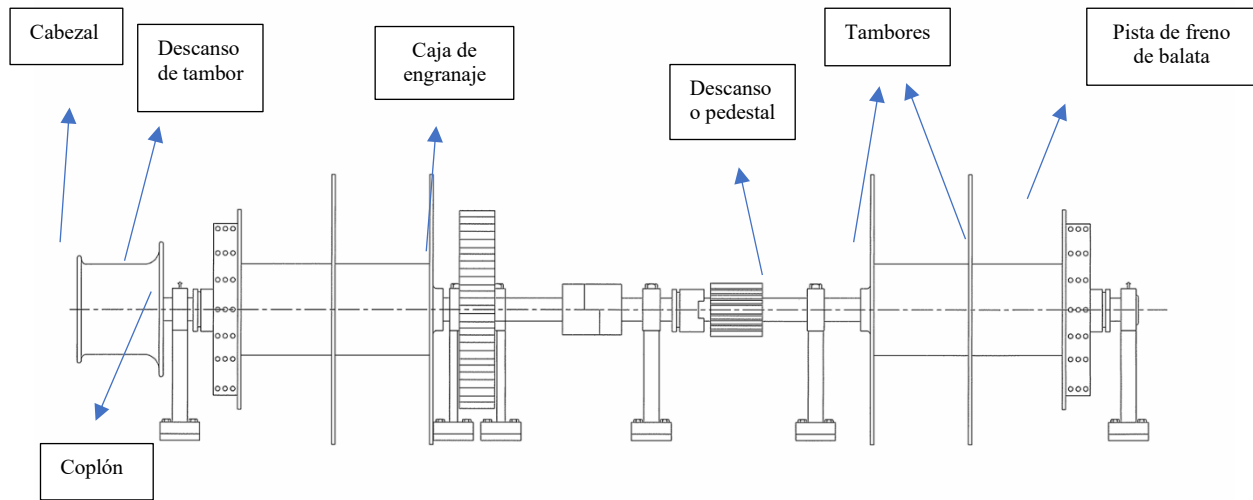


Ilustración 1-9.- Vista en plano

Fuente: Elaboración propia

✓ Descanso o pedestal

El descanso o pedestal son los pilares que soportan todas las cargas y la estructura completa del cabrestante, son las bases de este. Por lo general son 4 como mínimo en los cabrestantes de los mercantes.



Ilustración 1-10.- Descanso

Fuente: Elaboración propia

✓ Eje

El eje del cabrestante es el elemento que transmite el movimiento del motor al tambor, soportando las cargas torsionales y radiales para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.



Ilustración 1-11.- Eje

Fuente: Elaboración propia

✓ Barbontín

Es el calzo donde trabaja la cadena, la que soporta las cargas al bajar o subir la carga del ancla, este mantiene alineada la cadena y ancla evitando enredamiento.

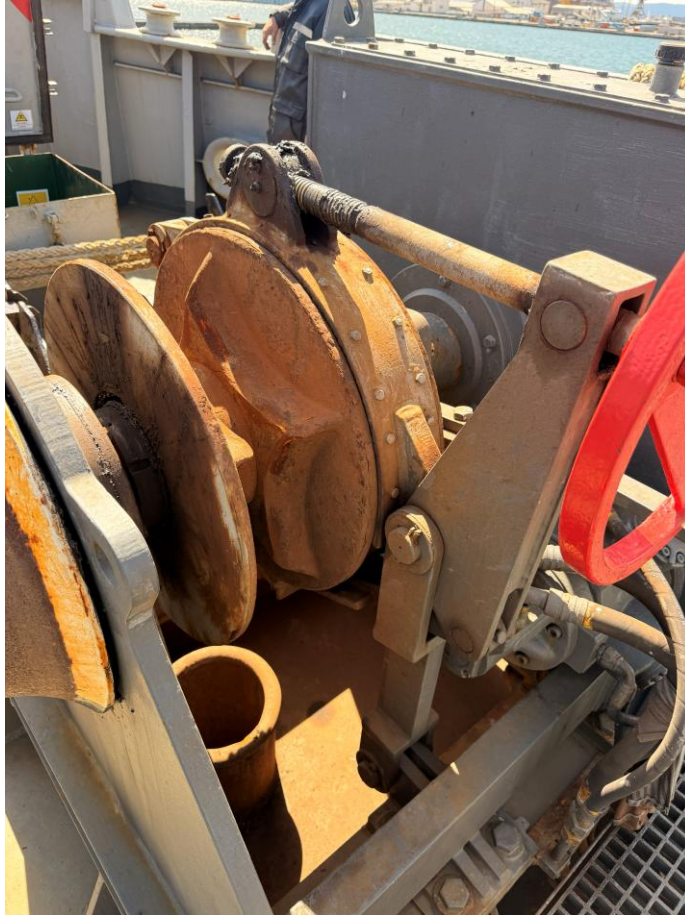


Ilustración 1-12.- Barbontín

Fuente: Elaboración Propia

✓ Caja reductora de engranaje

Es el conjunto de transmisión encargado de convertir la energía proveniente del motor hidráulico o eléctrico en movimiento útil para el Barbontín. El motor acciona un piñón que engrana con una corona, reduciendo la velocidad de giro y aumentando el torque necesario para la operación.

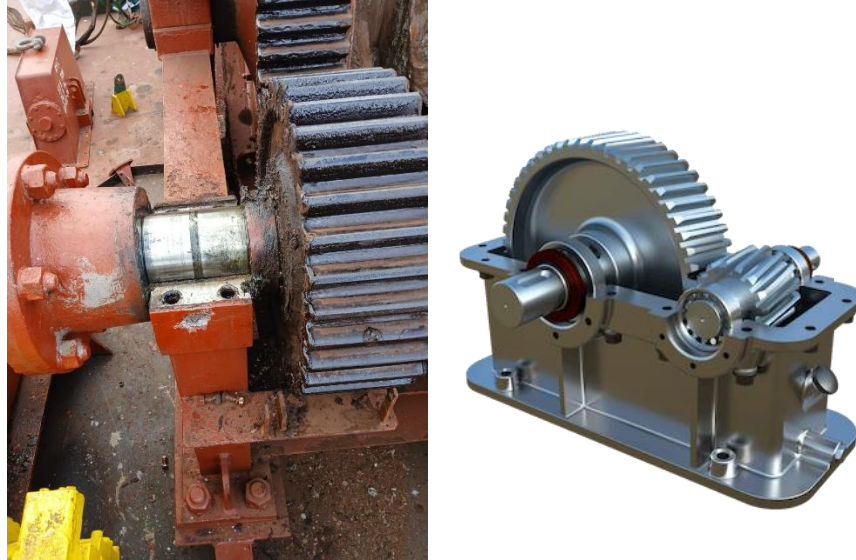


Ilustración 1-13.- Caja reductora

Fuente: Propia

✓ Cabezal y tambor

El tambor enrolla y desenrolla el cable o cadena, transmitiendo la fuerza necesaria para izar o tensar la carga. El cabezal permite maniobrar cabos directamente, facilitando el control y amarre de líneas sin necesidad de enrollarlas completamente en el tambor.



Ilustración 1-14.- Cabezal y tambor

Fuente: Propia

✓ Encapillador

El encapillador que acopla y desacopla la transmisión es el mecanismo que conecta o desconecta el movimiento del motor hacia el cabrestante, permitiendo dejar el sistema en marcha, en neutro o libre según la maniobra, es accionado por una palanca manual.

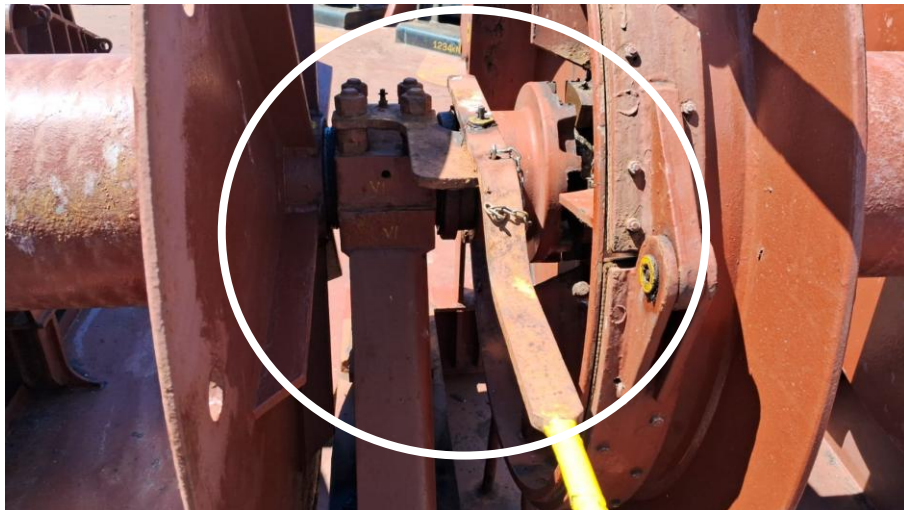


Ilustración 1-15.- Encapillador y palanca

Fuente: Propia

✓ Balatas de freno

La balata de freno en un cabrestante es el componente que genera la fricción necesaria para detener o controlar la velocidad del tambor, actuando contra un disco o tambor de freno. La balata suele ser de fibra compuesta.



Ilustración 1-16.- Balata de freno

Fuente: Propia

✓ Motor eléctrico o hidráulico

El motor del cabrestante es el componente que genera la potencia necesaria para mover el tambor y realizar las maniobras, ya sea mediante energía eléctrica o hidráulica.

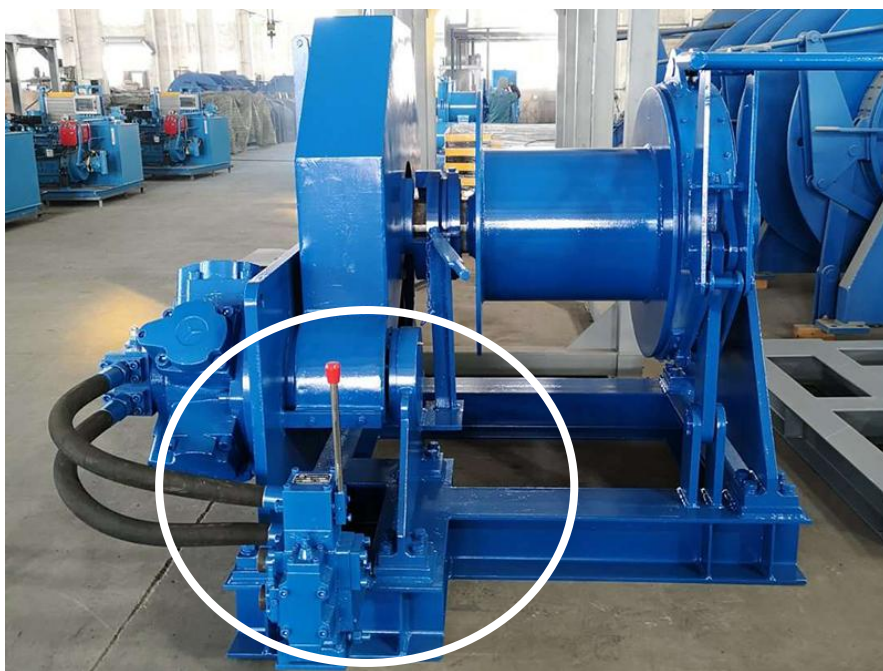


Ilustración 1-17.- Motor eléctrico

Fuente: Internet

1.2.4 Función del cabrestante

El cabrestante permite levantar, mover y controlar cargas como cadenas y cabos durante maniobras de fondeo, amarre y remolque, asegurando el manejo seguro del buque.

CAPÍTULO 2: SITUACIÓN ACTUAL

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante las operaciones de carena en la planta industrial de ASMAR Talcahuano, se ha detectado un patrón crítico de fallas en los cabrestantes hidráulicos de anclaje de diversos buques de alto bordo. El problema central radica en el sistema de bocinas de bronce instaladas en los pedestales de estos equipos. Aunque estas piezas son vitales para soportar las cargas axiales y radiales durante el fondeo, su diseño tradicional depende de una lubricación constante que, en el ambiente marino real, resulta ineficiente.

La investigación en terreno revela que la exposición al agua de mar, la salinidad y los sedimentos obstruyen sistemáticamente los canales de engrase. Esto anula la película lubricante y provoca un contacto metal con metal que deriva en sobrecalentamiento, pérdida de alineación y el eventual trabamiento del cabrestante. Esta vulnerabilidad técnica genera una reacción en cadena: ante la falla del equipo de babor, la tripulación sobrecarga el de estribor, provocando que ambas unidades queden inoperativas y obligando al buque a realizar mantenimientos correctivos de alto costo y paradas no programadas en dique.

Para romper este ciclo de falla recurrente, se propone una mejora tecnológica mediante la sustitución del bronce por polímeros marinos de alto rendimiento, específicamente la tecnología Thordon ThorPlas-Blue. Esta solución permite que los pedestales operen de manera confiable sin depender de lubricantes externos, eliminando el riesgo de obstrucción por corrosión y aumentando drásticamente la disponibilidad operativa del buque. El objetivo es transformar un diseño propenso a fallas en un sistema de alta confiabilidad que reduzca los costos operativos para los armadores que transitan por ASMAR.

Esquema Técnico de la Propuesta

Diagnóstico del Sistema Actual

- Material: Bronce (requiere lubricación hidrodinámica/grasa).

Puntos de Dolor:

- Corrosión y Gripado: Reacción química y mecánica ante el agua de mar.
- Obstrucción Logística: Canales de lubricación ineficientes por acumulación de sedimentos.
- Falla Operativa: Desgaste acelerado que produce el "fuera de servicio" de ambos cabrestantes (babor/estribor).

Especificaciones del Material de Mejora: Thordon ThorPlas-Blue

- Naturaleza: Polímero termoplástico rígido de alta presión.

Propiedades Clave:

- Autolubricado: No requiere grasa (lubricantes incorporados en la matriz del material).
- Resistencia a la Corrosión: Inmune a la oxidación y al ataque químico marino.
- Capacidad de Carga: Soporta presiones operativas de hasta 31 MPa (aprox. 4500 psi).
- Bajo Coeficiente de Fricción: Reduce el par de arranque y el desgaste del eje.

Beneficios del Rediseño de Pedestales

- Eliminación de Mantenimiento Manual: Reducción de horas hombre en engrase de cubierta.
- Seguridad Operacional: Garantía de funcionamiento en maniobras críticas de fondeo.
- Sostenibilidad Ambiental: Eliminación de derrames de grasa al océano.
- Optimización Financiera: Extensión de los periodos entre ingresos a dique y reducción de repuestos correctivos.

2.1 CABRESTANTE HIDRÁULICO DE ANCLAJE

El sistema de cabrestante seleccionado como caso de estudio para este proyecto de titulación corresponde a un equipo de accionamiento hidráulico fabricado en el año 2002 por la compañía TTS Marine (modelo combinado 76-U3). Este equipo se encuentra instalado en el buque MT Cabo Vírgenes (IMO 9253753), una embarcación mercante dedicada al transporte de hidrocarburos y derivados del petróleo.



Ilustración 2-1.- Cabrestante Hidráulico de anclaje

Fuente: Internet



Ilustración 2-2.- Barbontín del cabrestante

Fuente: Elaboración propia

Funciones del cabrestante en este barco mercante

El cabrestante cumple funciones múltiples, ya que permite tanto el fondeo del barco en la zona designada como su amarre seguro en el muelle.

2.2 PARTES DEL CABRESTANTE

➤ Eje



Ilustración 2-3.- Eje del Cabrestante

Fuente: Elaboración propia

➤ Caja reductora

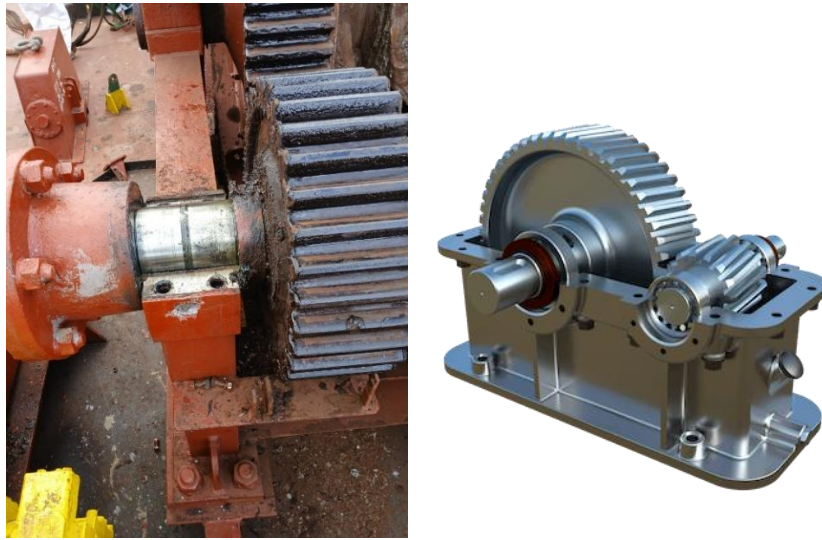


Ilustración 2-4.- Caja Reductora

Fuente: Elaboración propia

➤ Motor hidráulico



Ilustración 2-5.- Motor Hidráulico

Fuente: Internet

➤ Barbontín



Ilustración 2-6.- Barbontín del Cabrestante hidráulico de anclaje

Fuente: Elaboración propia

➤ Tambores y cabezales



Ilustración 2-7.- Tambor y Cabezal del cabrestante hidráulico

Fuente: Elaboración propia

➤ Balata de freno



Ilustración 2-9.- Balata del cabrestante Hidráulico

Fuente: Elaboración propia

➤ Encapilladores



Ilustración 2-10.- Encapilladores del cabrestante Hidráulico

Fuente: Elaboración propia

2.3 SISTEMAS DEL CABRESTANTE

Sistema hidráulico

Componente	Descripción
Sistema hidráulico	Es el conjunto encargado de transformar la potencia mecánica en energía hidráulica útil. Mediante presión y caudal, alimenta todos los actuadores necesarios para que el cabrestante funcione de manera continua y controlada.
Motor hidráulico	Utiliza el flujo y la presión del fluido para generar movimiento rotativo. Este motor es el que finalmente transmite el torque necesario para mover el tambor o el sistema mecánico del cabrestante.

Componente	Descripción
Conductos y mangueras hidráulicas	Elementos que interconectan el sistema, permitiendo que el fluido circule de forma segura entre bombas, válvulas y motores. Su función es garantizar el transporte estable del fluido sin pérdidas ni restricciones.
Tanque de fluido hidráulico	Depósito destinado a almacenar el aceite hidráulico, mantener su temperatura adecuada y permitir la decantación de impurezas. Actúa como reserva principal del fluido para todo el sistema.

Fuente: Elaboración propia

Sistema de tracción

Componente	Descripción
Tambor	Elemento cilíndrico sobre el cual se enrolla o libera el cabo o espía. Su función es controlar el manejo del cable en las maniobras de amarre y tracción.
Eje	Encargado de transferir el movimiento rotacional generado por el motor hacia el tambor, asegurando la transmisión eficiente de torque.
Caja reductora	Mecanismo que disminuye la velocidad de giro proveniente del motor y la convierte en un torque mayor, necesario para las cargas aplicadas en el cabrestante.
Encapillador	Sistema que permite conectar o desconectar la línea de transmisión, habilitando o bloqueando el accionamiento del tambor según la operación requerida.

Fuente: Elaboración propia

Sistema de control

Componente	Descripción
Mando hidráulico	Dispositivo de control compuesto por palancas hidráulicas que permiten al operador gestionar el movimiento del cabrestante, regulando con precisión las funciones de izado, descenso y detención.
Control manual	Modalidad de operación en la que el cabrestante es manipulado íntegramente por un operador, sin intervención de sistemas automáticos, garantizando control directo sobre cada maniobra.

Fuente: Elaboración propia

Sistema estructural

Componente	Descripción técnica
Base del cabrestante	Estructura principal donde se monta el sistema completo del cabrestante. Proporciona rigidez, estabilidad y soporte, absorbiendo los esfuerzos estáticos y dinámicos generados durante las maniobras de fondeo, amarre o carga. Garantiza una fijación segura a la cubierta del buque.
Pedestales (descansos)	Elementos estructurales que soportan el eje del cabrestante mediante bocinas o cojinetes. Su función es mantener la alineación del eje, soportar cargas radiales y axiales, y permitir el giro del sistema rotativo reduciendo fricción y desgaste. Pueden incorporar materiales como bronce o polímeros de alto rendimiento (Thordon ThorPlas-Blue).

Fuente: Elaboración propia

Sistema de frenado

Componente	Descripción técnica
Balatas	Elementos fundamentales del sistema de frenado que generan la fricción necesaria para detener o controlar el giro del tambor del cabrestante. Están fabricadas en fibra compuesta , un material resistente al desgaste, a las altas temperaturas y a condiciones de operación exigentes, lo que garantiza un frenado seguro y estable durante las maniobras.

Fuente: Elaboración propia

2.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CABRESTANTE HIDRÁULICO DE ANCLAJE

Datos del anclaje

Masa del ancla	8.700 kg
Diámetro / grado de la cadena	73 mm – Grado U3

Elevador de cable con freno de banda	1 unidad integrada en el sistema
Conexión del elevador de cable	Con acople directo al sistema de tracción
Material del elevador de cable	Acero fundido de alta resistencia
Control del freno del elevador de cable	Operación manual mediante palanca mecánica
Carga de retención con tope de cable	1.795,5 kN
Tapa de engranaje	Tipo abierto (acceso directo a engranajes)
Tracción nominal	248,3 kN
Tracción máxima (intermitente)	372,5 kN
Velocidad de elevación del ancla	0–9 m/min
Sociedad de clasificación	Lloyd's Register of Shipping
Masa total del cabrestante	5.900 kg
Relación de transmisión del elevador de cable	6,38
Torque en el motor hidráulico (operación nominal)	1.627 Nm
Máximo torque del motor hidráulico (diseño)	1.800 Nm
Presión diferencial a carga nominal	225 bar
Presión diferencial con sobrecarga	250 bar
Presión máxima de trabajo del sistema	250 bar
Flujo de aceite requerido	200 L/min
Desplazamiento volumétrico del motor hidráulico	0,493 L/rev

Fuente: Elaboración propia, basada en catálogos de fabricantes de cabrestantes marinos (MacGregor, Ibercisa, Adria Winch) y normativa de sociedades de clasificación (Lloyd's Register, DNV, ABS).

Datos del amarre

Ítem	Especificación técnica
Sistema de auto-tensión	Mantiene automáticamente la tensión requerida en la línea de amarre para compensar movimientos del buque por oleaje, corrientes y viento.
Tambor cilíndrico con freno de banda	Tambor principal equipado con freno de banda mecánico, diseñado para controlar la tensión y detener el movimiento cuando sea requerido.
Conexión del tambor	Mediante embrague de garra, permitiendo acoplar o desacoplar el tambor para operación, almacenamiento o libre giro.
Dimensiones del tambor	490 mm de diámetro × 1575 mm de largo.
Capacidad del tambor (zona de trabajo, 1 capa)	Hasta 6 vueltas de cable de 80 mm, garantizando tracción óptima en la primera capa.
Capacidad del tambor (almacenamiento, 6 capas)	200 m de cabo o cuerda sintética.
Diámetro del cable o línea de amarre	Cuerda sintética de 80 mm, adecuada para tensiones altas y absorción de energía.
Brida de inmersión	Con sistema de fijación para mejorar el guiado y retención del cabo en el tambor.
Control del freno del tambor	Freno de banda accionado por muelle con desbloqueo hidráulico, asegurando retención mecánica en fallo de presión.
Carga máxima de retención del freno	488 kN.
Extremo de alabeo (warping end)	1 unidad integrada para maniobras directas de tensión o guiado de cabos.
Dimensiones del extremo de alabeo	450 × 450 mm.

Fuente: Elaboración propia, basada en catálogos de fabricantes de cabrestantes marinos (MacGregor, Ibercisa, Adria Winch) y normativa de sociedades de clasificación (Lloyd's Register, DNV, ABS).

2.5 USO DEL CABRESTANTE

Como se ha mencionado anteriormente, el buque mercante Cabo Vírgenes realiza principalmente travesías de corta y media distancia dentro del litoral argentino, operando entre puertos como Buenos Aires, Campana y otros terminales del Atlántico Sur. Este tipo de operación implica recaladas frecuentes y maniobras repetitivas de fondeo y amarre al muelle durante sus ciclos normales de navegación.

El uso del cabrestante en un buque cisterna para el transporte de productos petrolíferos se distribuye principalmente entre las maniobras de fondeo y levante de ancla, así como las maniobras de amarre al muelle durante las operaciones portuarias. En condiciones normales de operación, este tipo de buque realiza aproximadamente 6 maniobras mensuales de fondeo, asociadas a esperas operativas, congestión portuaria o condiciones meteorológicas adversas, y cerca de 15 maniobras mensuales de amarre al muelle, vinculadas a las operaciones de carga y descarga en terminales.

Considerando un período operativo típico de dos años, previo al ingreso del buque a dique para una mantención mayor, el sistema de cabrestantes alcanza un uso acumulado aproximado de 504 maniobras, de las cuales 144 corresponden a maniobras de fondeo y 360 a maniobras de amarre al muelle. Este nivel de operación representa una exigencia significativa para los componentes mecánicos del sistema, en particular para el eje, los pedestales y las bocinas, los cuales están sometidos de manera recurrente a cargas axiales y radiales elevadas, propias de las maniobras de anclaje y del control de tensión de las espías durante la estadía en muelle.

2.6 DURACIÓN DE LA MANIOBRA DE FONDEO

El tiempo de ejecución de la maniobra de fondeo utilizado en el Cabo vírgenes está directamente influenciado por las condiciones meteorológicas y oceanográficas (viento, corriente y estado de mar), así como por la necesidad de realizar un asentamiento progresivo del cabo, propio de materiales nuevos. En condiciones operativas normales, el tiempo efectivo de utilización del cabrestante durante la maniobra de fondeo en zona designada se estima en aproximadamente 35 a 45 minutos, valor coherente con prácticas reales de operación en buques mercantes de tamaño medio.

En el caso del fondeo y amarre a muelle con Cabo Vírgenes, el tiempo de la maniobra depende de la planificación del práctico, la cantidad de paños de cabo largados al agua, la necesidad de ajustar tensiones iniciales y las condiciones ambientales. Dado que los cabos nuevos presentan mayor rigidez inicial y requieren múltiples ajustes de tensión durante la primera etapa de uso, el tiempo total de operación del cabrestante para completar el amarre a muelle se sitúa, en promedio, entre 90 y 110 minutos, adoptándose un valor representativo de 100 minutos por maniobra.

Para estimar el total de horas de operación del cabrestante en un período de dos años, se considera una frecuencia operacional realista de 144 maniobras de fondeo y 360 maniobras de amarre a muelle, valores acordes a la rotación típica de un buque mercante en servicio regular. El cálculo incorpora 40 minutos por cada maniobra de fondeo y 100 minutos por cada maniobra de amarre a muelle, permitiendo obtener una estimación representativa del tiempo efectivo de uso del cabrestante bajo condiciones reales de operación con cabos vírgenes.

Cálculo del tiempo total de operación

- Para las maniobras de fondeo en zona de fondeo

$$\text{Maniobra de fondeo} = 72 \times 40 \text{ minutos} = 2,880 \text{ Minutos}$$

$$x = 2,880 \text{ minutos} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ minutos}}$$

$$x = \frac{2,880}{60} \text{ horas}$$

$$x = 48 \text{ horas}$$

- Para las maniobras de Amarre al muelle con las espías

$$\text{Amarre a muelle} = 180 \times 100 \text{ minutos} = 18,000 \text{ minutos}$$

$$x = 18,000 \text{ minutos} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ minutos}}$$

$$x = \frac{18,000}{60} \text{ horas}$$

$$x = 300 \text{ horas}$$

- En 2 años tenemos:

$$\text{Total de horas a 2 años}$$

$$= (\text{Horas al año de Maniobra fondeo} \times 2)$$

$$+ (\text{Horas al año de Amarre a muelle} \times 2)$$

$$\text{Total de horas a 2 años} = 96 \text{ h} + 600 \text{ h}$$

$$\text{Total de horas a 2 años} = 696 \text{ horas}$$

Un buque cisterna para el transporte de productos petrolíferos realiza, en condiciones normales de operación, un promedio de 15 maniobras mensuales de amarre al muelle, asociadas a las operaciones de carga y descarga en terminales. Adicionalmente, efectúa aproximadamente 6 maniobras mensuales de fondeo, principalmente por espera de atraque, inspecciones o condiciones operativas del puerto.

2.7 EL OVERHAUL

En el contexto de la industria naval y las capacidades de ASMAR, el *overhaul* se define como una intervención técnica profunda orientada a restaurar la operatividad total de sistemas críticos. Durante la estadía de un buque mercante en dique, se ejecutan estos mantenimientos mayores de forma integral, cumpliendo con los estándares de seguridad y las normativas de las casas clasificadoras.

Para el caso específico de los cabrestantes hidráulicos de anclaje, el protocolo de mantenimiento en ASMAR se divide en dos niveles estratégicos:

1. Overhaul Mayor (Bianual): Coincidiendo con el ingreso a dique cada dos años, se realiza un desmontaje y revisión completa de componentes críticos (ejes, pedestales, frenos y sistemas hidráulicos). Es aquí donde la implementación de la tecnología Thordon ThorPlas-Blue cobra mayor relevancia, permitiendo que esta restauración no sea solo una reparación, sino una mejora de diseño que optimiza el comportamiento del equipo para el siguiente ciclo.
2. Overhaul Parcial o "Mini Overhaul" (Semenstral): Se ejecutan mantenimientos preventivos periódicos cada seis meses. Estas intervenciones buscan detectar de forma temprana desgastes o desalineaciones, asegurando que el cabrestante mantenga su confiabilidad entre las entradas a dique.

Listado Técnico de Mantenimiento y Restauración

Definición Operativa del Overhaul

- Objetivo: Restauración a condición "cero horas" o condiciones óptimas de diseño.
- Procesos Core: Desmontaje total, inspección metrológica, ensayos no destructivos (END), reemplazo de partes de sacrificio y pruebas de carga.
- Marco Normativo: Cumplimiento de estándares de sociedades de clasificación (ej. ABS, LR, DNV).

Clasificación de Intervenciones

Tipo de Intervención	Frecuencia	Alcance Técnico
Overhaul Mayor	24 meses (Dique)	Desmontaje de eje, rectificado de superficies, cambio de bocinas (Propuesta Thordon), revisión de sellos y sistema hidráulico.

Tipo de Intervención	Frecuencia	Alcance Técnico
Mini Overhaul	6 meses (Operativo)	Inspección visual, comprobación de alineamiento, limpieza de conductos y detección temprana de fallas incipientes.

Checklist de Componentes Críticos a Intervenir

- Eje Principal: Inspección de desgaste superficial y concentricidad.
- Pedestales y Descansos: Evaluación de la integridad estructural del soporte.
- Bocinas (Cojinetes): Verificación de huelgos y evaluación para la transición de bronce a polímeros autolubricados.
- Sistema de Frenado: Inspección de balatas, bandas y mecanismos de accionamiento.
- Accionamiento Hidráulico: Revisión de presiones, filtraciones en motores y estado de mangueras/tuberías.

Propuesta de Valor en el Overhaul

Al integrar Thordon ThorPlas-Blue durante el Overhaul Mayor en ASMAR, se transforma el mantenimiento correctivo en una modernización (retrofitting). Esto garantiza que el coeficiente de fricción se mantenga bajo y constante, eliminando la necesidad de las intervenciones críticas que suelen motivar los fallos antes de los 6 meses de operación normal.

Revisión visual semestral de los siguientes componentes:

- Estructura
- Cables
- Componentes del cabrestante
- Lubricación
- Sistema hidráulico
- Bocinas de los descansos (Pedestales)

Motor

Tras las revisiones visuales, se realizan pruebas de funcionamiento del cabrestante, que incluyen las pruebas de subida y bajada del ancla. Estas pruebas aseguran que el mecanismo este completamente funcional y se realizan de manera regular para verificar que el sistema operativo del cabrestante se encuentre en condiciones óptimas.

Por otro lado, el cabrestante sigue un programa de lubricación especificado en su manual, el cual indica que se debe engrasar cada dos semanas todas las graseras interiores (ubicadas en el interior del cabrestante) y cada cuatro semanas las partes externas (ubicadas en los extremos del cabrestante).

Se detallará lo que implica el overhaul completo del cabrestante hidráulico de anclaje:

1.- Inspección estructural del cabrestante



Ilustración 2-11.- Cabrestante Hidráulico de anclaje

Fuente: Elaboración propia

2.- Desmontar toda conexión hidráulica, que es ejecutada por otro taller (Taller 35)



Ilustración 2-12.- Sistema Hidráulico

Fuente: Repositorio USM

3.- Retiro de los pernos de la base para realizar la maniobra de izaje y así llevarlo al taller encargado de realizar la mantención (Taller 38)



Ilustración 2-13.- Izado del cabrestante

Fuente: Repositorio USM

4.- Este estando en el taller, se realiza el desarme completo de este, y así de igual manera se le realiza mediciones preliminares al Eje, a las bocinas de bronce y a su caja reductora.





Ilustración 2-14.- Desmontaje del cabrestante (Eje)

Fuente: Elaboración propia





Ilustración 2-15.- Desarme de cabrestante (Encapillador y engranajes)

Fuente: Repositorio USM

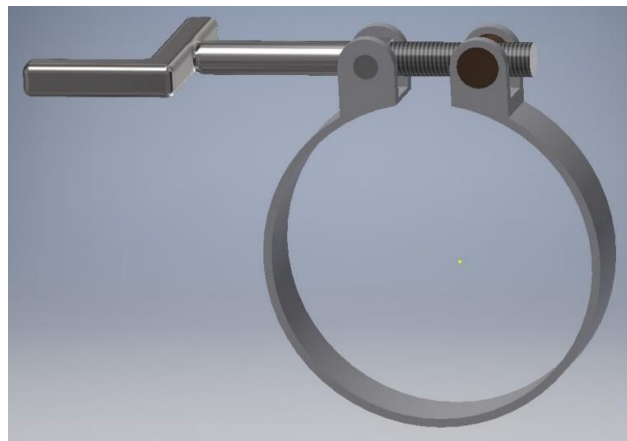


Ilustración 2-16.- Desmontaje del cabrestante (Balata de freno)

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 2-17.- Desmontaje del cabrestante (Bocina descanso)

Fuente: Elaboración propia

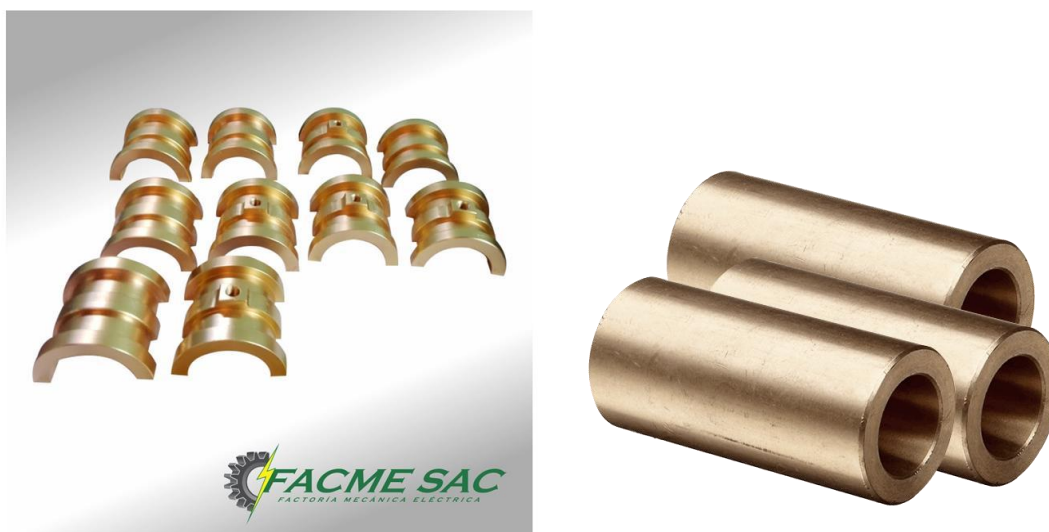


Ilustración 2-18.- Bocinas de descanso

Fuente: Elaboración propia

Una vez completado el informe con la identificación de fallas y daños en los componentes del cabrestante, el superintendente determina qué piezas deben repararse o reemplazarse por nuevas.

Por lo general se hace las reparaciones recomendadas por el Astillero.

Tras la decisión del superintendente, se procede a reparar o sustituir los componentes dañados. Posteriormente, se realiza el montaje, instalación y pruebas funcionales del cabrestante, asegurando que el equipo quede completamente operativo.

En dique se ejecutan pruebas funcionales sobre los sistemas críticos del cabrestante, incluyendo frenos, encapilladores, puntos de engrase, caja de engranajes, motor y mando hidráulicos, con el objetivo de detectar posibles anomalías en las funciones de amarre y fondeo. Estas verificaciones se realizan en presencia del superintendente, jefe de máquinas y personal autorizado del buque. Una vez completadas las pruebas, se procede al izado de las cadenas para habilitar la salida del buque del dique.

2.8 DATOS

La información presentada proviene de los informes de fallas recopilados antes del ingreso del cabrestante al dique, correspondientes a un período de dos años de operación del sistema hidráulico de anclaje.

Frecuencia de fallas en el cabrestante

COMPONENTE	FRECUENCIA (N° fallas)	TIEMPO DE INACTIVIDAD (h)	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
Eje	0	0	Alta robustez, falla solo en eventos catastróficos o mala alineación
Barbontín	1	72	Desgaste por contacto con cadena y corrosión; reparación requiere desmontaje parcial
Tambores	1	120	Ovalización leve o daño superficial; suele corregirse en varada
Caja reductora	1	36	Fugas o desgaste de engranajes; intervención mayor pero poco frecuente

COMPONENTE	FRECUENCIA (N° fallas)	TIEMPO DE INACTIVIDAD (h)	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
Balatas de freno	4	32	Elemento de desgaste normal en fondeo y amarre
Encapillador	2	10	Problemas de acople/desacople por contaminación o ajuste
Bujes de bronce (pedestales)	4	64	Desgaste acelerado por carga + ambiente marino → componente crítico
Bomba hidráulica	1	48	Fallas por contaminación del aceite o desgaste interno
Motor hidráulico	0	0	Alta confiabilidad; fallas raras si el sistema está limpio
Mangueras hidráulicas	3	6	Envejecimiento, microfisuras, vibración
Canales de engrase	4	4	Obstrucciones por grasa contaminada
Mando hidráulico / válvulas	1	24	Atascamiento o pérdida de presión

Fuente: Elaboración propia

2.8.1 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto se apoya con el estudio gráfico de barras que se clasifica de izquierda a derecha, el diagrama se enfoca en un porcentaje de fallas que se le conoce como 80/20, el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas, permitiéndonos enfocarnos en los problemas que representan el 80% según el gráfico.

Se realizará el diagrama de Pareto para analizar y desarrollar el plan de mantenimiento para el cabrestante hidráulico de anclaje, se considerará los siguientes datos:

COMPONENTE	FRECUENCIA	TIEMPO DE INACTIVIDAD (h)	TIEMPO TOTAL DE INACTIVIDAD (h)	% ACUMULADO
Bujes de bronce (pedestales)	4	64	256	30,6%
Tambores	1	120	120	45,0%
Barbontín	1	72	72	53,6%
Balatas de freno	4	32	128	68,9%
Bomba hidráulica	1	48	48	74,6%
Caja reductora	1	36	36	78,9%
Mando hidráulico / válvulas	1	24	24	81,8%
Encapillador	2	10	20	84,2%
Mangueras hidráulicas	3	6	18	86,3%
Canales de engrase	4	4	16	88,2%
Eje	0	0	0	100%

COMPONENTE	FRECUENCIA	TIEMPO DE INACTIVIDAD (h)	TIEMPO TOTAL DE INACTIVIDAD (h)	% ACUMULADO
Motor hidráulico	0	0	0	100%

Tabla 2-9.- Diagrama de Pareto

Fuente: Elaboración propia

- El **30,6%** de la indisponibilidad del cabrestante se concentra únicamente en los bujes de bronce, confirmando su alta criticidad operativa.
- Los primeros cuatro componentes (bujes, tambores, barbotín y balatas) concentran casi el **70%** del tiempo total de inactividad, validando plenamente la aplicación del Principio de Pareto (80/20).
- Los elementos hidráulicos auxiliares (mangueras, engrase y encapillador) presentan alta frecuencia, pero bajo impacto, por lo que deben gestionarse mediante mantenimiento preventivo.
- Componentes estructurales como eje y motor hidráulico no aportan horas de indisponibilidad, demostrando su alta confiabilidad.

Los datos recopilados corresponden a los componentes con mayor incidencia de fallas en el cabrestante durante un período de dos años (24 meses), registrando un total de **22 eventos y 738 horas de inactividad acumulada**. La información se presenta ordenada según el impacto operativo, desde el componente que generó el mayor tiempo de indisponibilidad hasta el de menor efecto. Con base en estos resultados, se elaborará el diagrama de Pareto para priorizar acciones y desarrollar el análisis correspondiente.

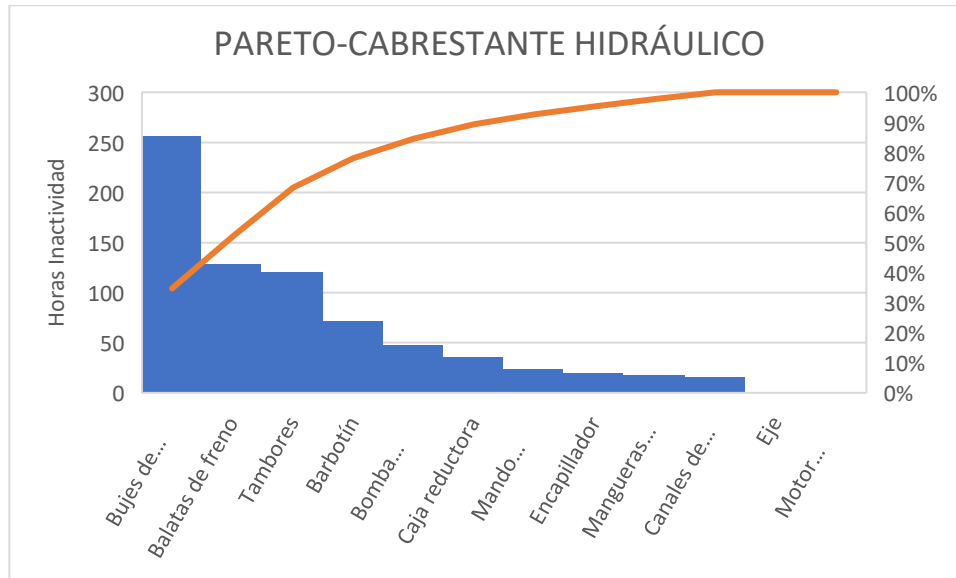


Ilustración 2-19.- Diagrama de Pareto

Fuente: Elaboración propia

El análisis del diagrama de Pareto evidencia que el **80%** de la indisponibilidad del cabrestante se concentra en cuatro componentes críticos: bujes de bronce, balatas de freno, tambores y barbotín. En consecuencia, las acciones correctivas y preventivas deben priorizar la solución de fallas asociadas a estos elementos para maximizar la confiabilidad del equipo.

2.8.2 Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa, también denominado espina de pescado o causa-efecto, es una herramienta que permite representar gráficamente las posibles causas que originan un problema específico. Su aplicación se complementa con otras metodologías de análisis, como el diagrama de Pareto, facilitando la priorización de acciones correctivas sobre aquellas causas que presentan mayor impacto en el desempeño.

El enfoque para la elaboración del diagrama de Ishikawa se centrará, a modo de ejemplo para el presente estudio, en uno de los componentes críticos identificados mediante el análisis de

Pareto del cabrestante hidráulico del buque *Cabo Virgenes*. En particular, se seleccionan los **bujes de bronce de los pedestales**, dado que concentran la mayor cantidad de horas de inactividad acumulada del sistema y representan el principal factor de indisponibilidad del cabrestante.

La elección de este componente se fundamenta en su impacto directo sobre la operatividad del equipo, ya que el desgaste prematuro de los bujes afecta el correcto apoyo y alineación del eje y del tambor, incrementando las cargas, vibraciones y fricción durante las maniobras de fondeo y amarre. Esta condición puede derivar en fallas secundarias, paradas no programadas y mayores tiempos de reparación, lo que se traduce en un aumento de los costos de mantenimiento y pérdidas económicas asociadas a la inactividad del buque.

Asimismo, el mal desempeño de los bujes de bronce compromete la capacidad del cabrestante para operar de forma segura y continua durante el fondeo en muelle, generando retrasos operativos y la necesidad de intervenciones correctivas adicionales. Por estas razones, el análisis de causa raíz mediante el diagrama de Ishikawa se orienta a este componente, con el objetivo de identificar las causas técnicas y operativas que justifican la propuesta de mejora mediante la sustitución por cojinetes poliméricos de alto desempeño.

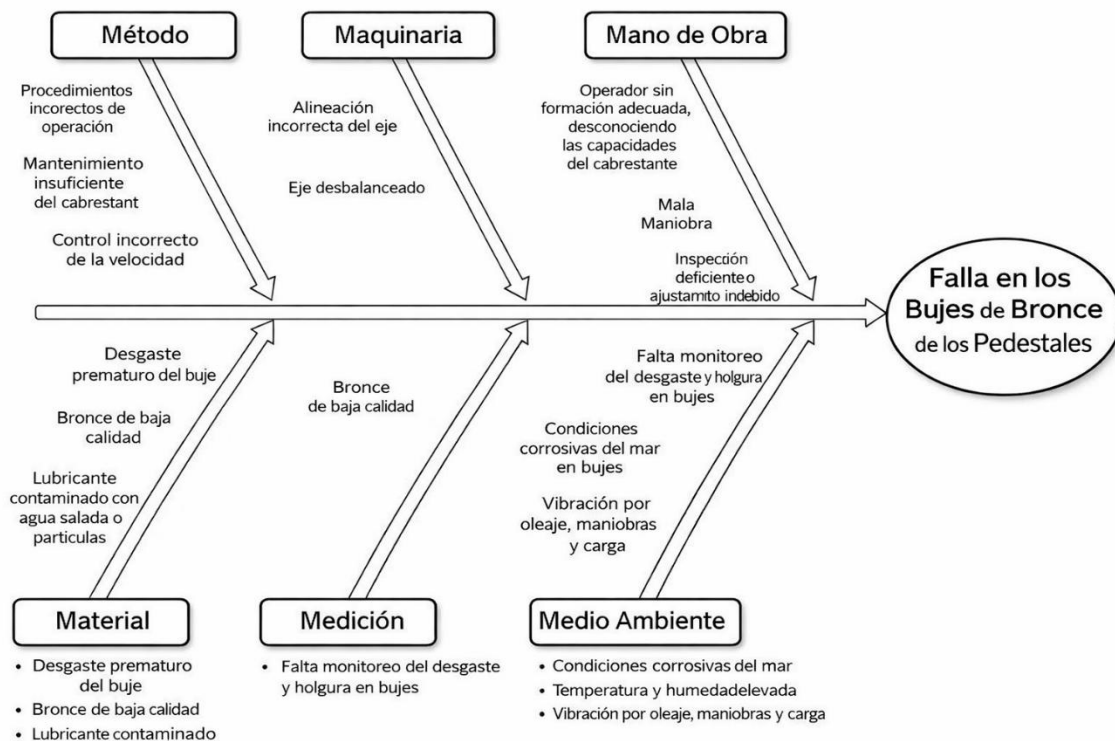


Ilustración 2-20.- Diagrama de Ishikawa

2.8.3 Análisis de Causa y Causa Raíz de la Falla

Identificación del problema

A partir del análisis de Pareto realizado sobre el historial de fallas del cabrestante hidráulico del buque Cabo Vírgenes, se determinó que los bujes de bronce de los pedestales constituyen el componente con mayor impacto en las horas totales de inactividad del sistema. La falla se manifiesta principalmente mediante desgaste prematuro, incremento de holguras, aparición de vibraciones y aumento de la temperatura durante las maniobras de fondeo y amarre.

Estas condiciones afectan directamente la confiabilidad del cabrestante, generando paradas operativas no programadas, mayores tiempos de reparación y un incremento en los costos de mantenimiento correctivo.

Análisis de causas (Diagrama de Ishikawa)

Para identificar las causas que originan la falla, se aplicó el diagrama de Ishikawa bajo el enfoque de las 6M: Método, Maquinaria, Mano de Obra, Material, Medición y Medio Ambiente.

1) Método:

Se identificó la existencia de procedimientos de operación y mantenimiento poco estandarizados, con intervalos de lubricación definidos principalmente por calendario y no por condición real del componente. Asimismo, no se establecen criterios claros para la detención preventiva del equipo ante la detección de síntomas de desgaste incipiente.

2) Maquinaria:

El desgaste progresivo de los bujes genera desalineación del eje del cabrestante, lo que incrementa las cargas radiales y axiales sobre los pedestales. Esta condición favorece la transmisión de vibraciones desde el tambor y el barbotín hacia el sistema de apoyo del eje, acelerando el deterioro del componente.

3) Mano de obra:

Se observa una limitada capacitación del personal en la detección temprana de fallas asociadas al desgaste de bujes. Las inspecciones suelen realizarse de manera reactiva, una vez que la falla ya se encuentra avanzada, lo que prolonga la operación del equipo en condiciones no óptimas.

4) Material:

Los bujes de bronce utilizados presentan una resistencia limitada frente a las condiciones reales de operación, especialmente en ambientes marinos con presencia de agua salada, humedad elevada y contaminantes abrasivos. Estas características tribológicas resultan insuficientes para el régimen de carga y operación del cabrestante.

5) Medición:

No existe un sistema de monitoreo de condición que permita controlar variables críticas como holgura, temperatura o vibraciones en los pedestales. La ausencia de registros históricos y límites de alarma impide anticipar la falla antes de que se vuelva crítica.

6) Medio ambiente:

El cabrestante opera en un entorno altamente corrosivo, expuesto de forma permanente al agua de mar, humedad y partículas abrasivas. Adicionalmente, las maniobras portuarias y el oleaje generan vibraciones adicionales que contribuyen al desgaste acelerado de los bujes.

3.- Determinación de la causa raíz

Del análisis integrado de las causas identificadas se concluye que la causa raíz principal de la falla es:

La utilización de bujes de bronce no adecuados para las condiciones reales de operación y ambiente marino del cabrestante hidráulico, sumado a la ausencia de monitoreo de condición que permita detectar oportunamente el desgaste progresivo del componente.

Las deficiencias en método, mano de obra, maquinaria y medición actúan como factores agravantes, pero no constituyen el origen fundamental del problema.

4.- Conclusión del análisis

El análisis de causa y causa raíz demuestra que la falla de los bujes de bronce de los pedestales no corresponde a un evento aislado ni exclusivamente operativo, sino que responde principalmente a una limitación de diseño y selección de material frente a las exigencias reales del entorno marino. Esta situación explica la alta incidencia del componente en las horas de inactividad del cabrestante y respalda técnicamente la necesidad de implementar una mejora de diseño, orientada a incrementar la confiabilidad, reducir las paradas no programadas y optimizar los costos de mantenimiento.

2.8.4 Análisis

El análisis de las principales problemáticas asociadas al funcionamiento del cabrestante hidráulico del buque *Cabo Virgenes* permite establecer una relación directa entre las deficiencias operativas, de mantenimiento y de diseño, y la causa raíz de las fallas identificadas en los bujes de bronce de los pedestales.

Las deficiencias en la lubricación, tanto en la selección del lubricante como en los procedimientos de engrase, provocan la pérdida de la película lubricante y la contaminación del sistema con agua salada y partículas abrasivas. Esta condición incrementa la fricción y el desgaste en los puntos de apoyo del eje, acelerando el deterioro de los bujes de bronce y generando holguras y vibraciones anormales durante la operación del cabrestante.

Por su parte, la protección superficial inadecuada de los componentes del cabrestante favorece la corrosión en un ambiente marino altamente agresivo. La corrosión no solo afecta directamente a los elementos estructurales, sino que también contribuye a la contaminación del lubricante y a la degradación de las superficies de contacto, intensificando el desgaste de los bujes y reduciendo su vida útil.

Asimismo, la falta de capacitación del personal operativo deriva en prácticas de operación inadecuadas, tales como maniobras con cargas dinámicas elevadas o el uso del equipo fuera de sus condiciones óptimas de funcionamiento. Estas acciones generan sobrecargas mecánicas adicionales y aumentan las sollicitaciones sobre los pedestales, lo que agrava aún más el desgaste del sistema de apoyo del eje.

En conjunto, estos factores no constituyen la causa fundamental de la falla, sino que actúan como factores desencadenantes y aceleradores de un problema de origen más profundo. En consecuencia, se determina que la causa raíz de la falla corresponde a:

La utilización de bujes de bronce con limitaciones técnicas para soportar las condiciones reales de operación y el ambiente marino del cabrestante hidráulico, sumada a la ausencia de un sistema de monitoreo de condición que permita detectar oportunamente el desgaste progresivo del componente.

Por lo tanto, las deficiencias identificadas en el análisis evidencian que las fallas observadas no pueden ser mitigadas de manera efectiva únicamente mediante mejoras operativas o ajustes en los procedimientos de mantenimiento. En cambio, resulta necesario abordar el problema desde una perspectiva de diseño y selección de material, lo que justifica la propuesta de sustitución de los bujes de bronce por cojinetes poliméricos de alto desempeño, orientados a incrementar la confiabilidad del sistema y reducir las horas de inactividad del cabrestante.





Ilustración 2-21.- Cabo Virgenes

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA

3. PROPUESTA DE MEJORA

3.1 DIAGNÓSTICO DEL ESQUEMA ACTUAL Y NECESIDAD DE MEJORA

Buque Cabo Virgenes

El estudio desarrollado en los capítulos anteriores permitió identificar que el cabrestante hidráulico de anclaje presenta una recurrencia significativa de fallas asociadas a los pedestales que soportan el eje principal del sistema. En particular, las bocinas de bronce actualmente instaladas concentran una proporción relevante de las horas de indisponibilidad operacional, situación confirmada mediante la aplicación de metodologías de análisis como Pareto, Diagrama de Ishikawa y Análisis de Causa Raíz.

Los resultados evidencian que el desgaste prematuro de las bocinas no obedece únicamente a deficiencias operativas o de mantenimiento, sino que responde a una limitación inherente del diseño actual y del material seleccionado. Dicho material no resulta plenamente compatible con las condiciones reales de operación del cabrestante en ambiente marino, caracterizadas por la presencia permanente de agua salada, contaminación por partículas abrasivas, cargas dinámicas variables y episodios de lubricación deficiente.

En consecuencia, se hace necesario implementar una solución que aborde la causa raíz del problema, orientada no solo a corregir la falla, sino también a mejorar estructuralmente la confiabilidad y disponibilidad del sistema. Esta solución debe alinear el diseño del componente con los principios del mantenimiento moderno y la gestión de activos, asegurando una mayor resiliencia frente a las condiciones de operación.

- **Enfoque general de la mejora propuesta**

A partir del análisis desarrollado en el Capítulo 2 —mediante la aplicación de las metodologías de Pareto, Diagrama de Ishikawa y Análisis de Causa Raíz— se determinó que los bujes de bronce instalados en los pedestales del cabrestante hidráulico de anclaje constituyen el principal componente crítico del sistema, concentrando el mayor porcentaje de horas de indisponibilidad operacional.

El desgaste prematuro de estos bujes no responde únicamente a prácticas operativas o deficiencias de mantenimiento, sino que se relaciona directamente con una limitación del diseño actual y de la selección del material, el cual no resulta adecuado para las condiciones reales de operación en ambiente marino. Dichas condiciones incluyen la exposición constante a agua salada, la presencia de contaminantes abrasivos y la acción de cargas dinámicas variables.

En este contexto, la propuesta de mejora se orienta a atacar la causa raíz identificada mediante la sustitución de las bocinas de bronce por cojinetes poliméricos de alto desempeño, específicamente diseñados para aplicaciones marinas severas. Esta solución se complementa con la integración de criterios de mantenimiento moderno, sistemas de monitoreo de condición y prácticas de gestión de confiabilidad, con el objetivo de incrementar la disponibilidad operacional y prolongar la vida útil del cabrestante.

El desgaste prematuro de estos bujes se asocia principalmente a:

- Condiciones ambientales marinas severas.
- Contaminación del lubricante con agua salada y partículas abrasivas.
- Limitaciones del material de bronce frente a cargas combinadas y lubricación deficiente.
- Ausencia de monitoreo de condición que permita detectar el desgaste progresivo.
- Poca aplicación de engrase por condiciones ambientales marinas

3.2 INCORPORACIÓN DE LA MEJORA EN LOS BUJES DE LOS PEDESTALES

Justificación técnica de la mejora

Los pedestales del cabrestante cumplen una función estructural crítica, ya que soportan el eje principal del sistema y absorben las cargas radiales, axiales y dinámicas generadas durante las maniobras de fondeo y amarre. El análisis realizado evidenció que los bujes de bronce actualmente instalados presentan las siguientes limitaciones:

- Alta dependencia de lubricación continua.
- Sensibilidad elevada a contaminación por agua salada y partículas abrasivas.
- Riesgo de contacto metal-metal ante pérdida de lubricante.
- Desgaste acelerado bajo cargas dinámicas y vibraciones.
- Incremento de holguras y desalineación progresiva del eje.

Estas condiciones explican la alta frecuencia de fallas y la recurrencia de intervenciones correctivas observadas durante los ciclos operativos del cabrestante.

Como solución estructural, se propone la implementación de cojinetes poliméricos tipo Thordon ThorPlas-Blue, o material de características técnicas equivalentes, los cuales presentan ventajas significativas frente al bronce tradicional en aplicaciones marinas.

Ventajas técnicas de los cojinetes poliméricos

La incorporación de cojinetes poliméricos en los pedestales del cabrestante permite abordar directamente las limitaciones identificadas en el sistema actual, aportando los siguientes beneficios técnicos:

- Operación sin lubricación o con lubricación mínima.
- Alta resistencia a la corrosión por agua de mar.
- Bajo coeficiente de fricción incluso en condiciones de operación en seco.
- Mayor tolerancia a desalineaciones y cargas de borde.
- Reducción del desgaste del eje y del fenómeno de fretting.
- Disminución de vibraciones y ruidos operativos.
- Menor impacto ambiental al eliminar el uso intensivo de grasas.

Esta mejora no solo incrementa la confiabilidad del sistema, sino que simplifica las tareas de mantenimiento y reduce la probabilidad de fallas súbitas durante maniobras críticas.



Ilustración 3-1.- Thordon ThorPlas-Blue

Fuente: Pagina Web Thordon

- Mantenimiento preventivo semestral (actualizado con enfoque en bujes)

El mantenimiento preventivo semestral considera las siguientes actividades, incorporando explícitamente la inspección de los pedestales:

Revisión visual de componentes críticos:

- Estructura del cabrestante
- Tambores y barbotín
- Bujes y pedestales (holguras, temperatura y ruidos anormales)
- Estado de la lubricación
- Sistema hidráulico
- Motor hidráulico

Pruebas de funcionamiento:

- Pruebas de subida y bajada del ancla.
- Verificación de vibraciones y comportamiento del eje durante la operación.
- Confirmación de la correcta alineación del sistema.

Programa de lubricación (ajustado a la mejora propuesta)

El programa de lubricación se mantiene conforme a las recomendaciones del fabricante para el resto de los componentes del cabrestante. Sin embargo, con la implementación de bujes poliméricos en los pedestales, se espera:

- Reducción de la dependencia de lubricación en los puntos críticos.
- Menor riesgo de contaminación por agua salada.
- Simplificación del mantenimiento y reducción de errores operativos.

Integración con mantenimiento predictivo

La mejora en los bujes de los pedestales se complementa con la implementación de técnicas predictivas:

- **Monitoreo de vibraciones** cada 6 meses en pedestales y bomba hidráulica.
- **Termografía infrarroja** para detectar aumentos anormales de temperatura en los descansos.
- **Inspección dimensional** de holguras durante varada o mantenimiento mayor.

Impacto esperado de la mejora

La incorporación de cojinetes poliméricos en los pedestales permitirá:

- Reducir significativamente las horas de inactividad del cabrestante.
- Disminuir la frecuencia de intervenciones correctivas.

- Aumentar la confiabilidad del sistema.
- Optimizar los costos de mantenimiento a mediano y largo plazo.
- Mejorar la seguridad operativa durante maniobras de fondeo y amarre.

3.3 ANÁLISIS DE CARGAS Y VALIDACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS BOCINAS DEL PEDESTAL

1. Evaluar las cargas y solicitaciones a las que están sometidas las bocinas de los 8 pedestales del cabrestante 76-U3, y comparar técnicamente el material actual (bocina de bronce) versus la propuesta de mejora (bocina polimérica Thordon ThorPlas-Blue), usando criterios de presión proyectada (P) y una matriz comparativa operacional.
2. Datos base confirmada
3. Geometría de la bocina
4. Todas las cargas/solicitaciones existentes sobre la bocina

En operación real, la bocina del pedestal está sometida a:

Parámetro	Valor
Diámetro interior (ID) / diámetro de eje	130 mm
Espesor de bocina	8 mm
Diámetro exterior ($OD = ID + 2t$)	146 mm
Largo de bocina (L)	170 mm
Cantidad de pedestales	8
Material de eje	SAE 4023

Solicitud	Origen típico en cabrestante	Efecto sobre la bocina
Carga radial (Fr)	Tiro de cadena/cabo + reacciones de transmisión	Presión de contacto y desgaste
Carga axial (Fa)	Desalineación, empujes, geometría del tiro	Carga al borde y calentamiento
Momento flector (M)	Tiro aplicado a distancia + peso tambor/reductora	Reparto desigual entre pedestales
Cargas dinámicas (shock)	Tirones por oleaje/garreos/frenadas	Picos de presión (daño acelerado)
Vibración / micro-movimientos	Motor hidráulico, reductora	Fretting y pérdida de película
Edge loading (carga de borde)	Flexión del eje + tolerancias de montaje	Desgaste localizado (en banda)
Contaminación abrasiva	Agua salada + óxidos + partículas	Rayado y desgaste severo
Térmica (ΔT)	Fricción + frenadas	Cambios de holgura y fricción

1. Criterio principal de verificación: Presión proyectada (P)

$$P = \frac{F}{D \cdot L}$$

$$D = 0,13 \text{ m}$$

$$L = 0,17 \text{ m}$$

a. Área proyectada real

$$A = D \cdot L = 0,13 \cdot 0,17 = 0,0221 \text{ m}^2$$

- P: presión proyectada (MPa)
- F: carga radial (N)
- D: diámetro del eje (m)
- L: largo de la bocina (m)

2. Tabla directa: Carga radial $\rightarrow$ Presión (con $L = 170$ mm)

Como $A = 0,0221 \text{ m}^2$, queda una relación práctica:

$$P(\text{MPa}) = \frac{F}{D \cdot L} \approx 0,04525 \cdot F(\text{kN})$$

Carga radial por bocina (kN)	Presión proyectada (MPa)
50	2,26
100	4,53
150	6,79
200	9,05
250	11,31
300	13,58
400	18,10

3. Comparación Bronce vs Thordon ThorPlas-Blue (con L real = 170 mm)

Presiones admisibles de diseño (conservadoras para comparación)

- Thordon

ThorPlas-Blue:

$$P_{adm} = 20 \text{ MPa}$$

(criterio conservador para maquinaria de cubierta, con cargas dinámicas y operación intermitente)

- Bronce

(bearing

bronze):

$$P_{adm} = 25 \text{ MPa}$$

(con buena lubricación y control de contaminación)

- Importante: si bien el bronce presenta una mayor presión admisible nominal, en ambiente marino el factor limitante suele ser la pérdida de lubricación, la contaminación abrasiva y el desgaste por partículas, más que la capacidad estructural del material.

4. Carga radial admisible por bocina ($L = 170 \text{ mm}$)

La carga radial admisible se calcula mediante:

$$F_{adm} = P_{adm} \cdot D \cdot L$$

Con:

- $D = 0,13 \text{ m}$
- $L = 0,17 \text{ m}$

Área proyectada:

- $D \cdot L = 0,0221 \text{ m}$

Para Thordon ThorPlas-Blue (20 MPa):

$$F_{adm} = 20 \cdot 10^6 \cdot 0,0221 = 442000 \text{ N}$$

$$F_{adm} \approx 442,0 \text{ kN}$$

Para Bronce (25 MPa):

$$F_{adm} = 25 \cdot 10^6 \cdot 0,0221 = 552500 \text{ N}$$

$$F_{adm} \approx 552,5 \text{ kN}$$

Tabla final (con $L = 170 \text{ mm}$)

Material de bocina	Presión admisible usada (MPa)	Carga radial admisible por bocina (kN)
Thordon ThorPlas-Blue	20	442,0 kN
Bronce	25	552,5 kN

5. Matriz comparativa operacional (lo que justifica la mejora)

Criterio	Bronce (actual)	ThorPlas-Blue (propuesta)
Dependencia de lubricación	Alta (crítica)	Baja / grease-free
Sensibilidad a contaminación	Alta	Menor
Riesgo por pérdida de lubricación	Alto	Bajo
Comportamiento ante shock	Bueno	Muy bueno
Vibración	Media	Alta tolerancia
Corrosión del material	Posible	No se corroe
Impacto ambiental	Uso de grasa	Menor impacto

6. Comparación económica cualitativa (Costo Total de Propiedad – TCO)

Ítem	Bronce	ThorPlas-Blue
Costo inicial	Bajo	Alto
Mecanizado	Medio	Medio–Alto
Lubricación	Alta (permanente)	Nula o baja
Frecuencia de recambio	Alta	Baja
Riesgo de paro no programado	Alto	Bajo
Costo total a largo plazo	Alto	Menor

7. Tabla por pedestal (ya cerrada con $L = 170 \text{ mm}$)

Esta tabla queda lista para completar cuando se disponga de la carga radial por pedestal (medida o estimada).

El cálculo de la presión proyectada es directo:

$$P(\text{MPa}) \approx 0,04525 \cdot F(\text{kN})$$

8. Síntesis técnica final

Aspecto evaluado	Resultado
Capacidad estructural	Adecuada
Adecuación a cabrestantes	Muy alta
Margen frente a cargas dinámicas	Alto
Reducción de mantenimiento	Significativa
Justificación del cambio	Técnica y económicamente sólida

Los resultados obtenidos demuestran que, si bien ambos materiales presentan capacidad estructural suficiente para las cargas analizadas, la bocina polimérica propuesta ofrece un comportamiento operacional superior en condiciones reales de servicio marino, lo que justifica su incorporación al sistema y su integración al plan de mantenimiento del cabrestante.

3.4 **CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LA MEJORA PROPUESTA**

Con el fin de evaluar objetivamente la efectividad de la mejora implementada, se establecen los siguientes criterios técnicos de aceptación, los cuales deberán cumplirse durante al menos un ciclo completo de operación entre varadas (24 meses):

- Ausencia de fallas por trabamiento o desgaste severo en los pedestales.
- Reducción mínima del 70% en las horas de indisponibilidad asociadas a bujes.
- Eliminación de la necesidad de lubricación correctiva en los descansos.
- Temperaturas de operación de los pedestales dentro de rangos normales, sin sobrecalentamientos anómalos.
- Ausencia de vibraciones excesivas asociadas a desalineación del eje.
- Conservación de holguras dentro de tolerancias admisibles durante inspecciones periódicas.

El cumplimiento de estos criterios permitirá validar técnicamente la mejora propuesta y confirmar su impacto positivo sobre la disponibilidad operativa del cabrestante.

3.5 **PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA MEJORA**

La implementación de la mejora propuesta se llevará a cabo durante el overhaul programado del cabrestante hidráulico, siguiendo el procedimiento técnico descrito a continuación:

1. Desmontaje del cabrestante y retiro de las bocinas de bronce existentes.
2. Inspección visual y dimensional del eje principal (ovalización, rayado, corrosión).
3. Medición de los alojamientos de los pedestales y verificación de tolerancias.
4. Corrección dimensional mediante mecanizado, en caso de ser necesario.
5. Instalación de los cojinetes poliméricos según especificaciones del fabricante.
6. Verificación de holgura radial y axial del conjunto eje–pedestal.
7. Montaje del cabrestante y alineación del sistema.
8. Pruebas funcionales en vacío.
9. Pruebas bajo carga controlada durante maniobras de fondeo y amarre.
10. Registro inicial de parámetros operativos en el sistema de gestión de mantenimiento.

Este procedimiento asegura una implementación controlada, minimizando riesgos asociados al montaje y garantizando la correcta operación del sistema desde su puesta en servicio.

3.6 **CHECKLIST DE PLAN DE MANTENIMIENTO EN ASMAR**

El cabrestante hidráulico de anclaje es un equipo crítico para la operación y seguridad del buque. Independientemente de su condición, la nave debe ingresar a dique seco de forma periódica, con una frecuencia aproximada de cada cinco años, por exigencias normativas y operativas.

En la situación actual, el uso de bocinas de bronce en los pedestales del cabrestante obliga a realizar **mantenciones correctivas en cada ciclo de dique**, debido al desgaste generado en ambiente marino. En la propuesta de mejora, el reemplazo de estas bocinas por bocinas poliméricas Thordon **no modifica la periodicidad de ingreso a dique**, pero sí elimina la necesidad de

intervenir correctivamente los pedestales del cabrestante, extendiendo su vida útil a un estimado de **15 a 20 años**.

Esta mejora permite reducir significativamente la frecuencia de intervención del cabrestante, las horas-hombre asociadas y los períodos de indisponibilidad del equipo, manteniendo los mismos procedimientos generales de mantención del buque.

- **Checklist actual**

Mantención mayor cabrestante – Sistema con bocinas de bronce

Frecuencia: cada 5 años

Lugar: ASMAR

Horas-hombre: 600 HH por cabrestante

Cantidad de cabrestantes: 2

Checklist de mantención mayor actual (Bronce)

Ítem	Etapas	Actividad	HH estimadas	Observaciones
1	Desmontaje	Retiro del cabrestante desde el buque	70	Trabajo pesado a bordo
2	Logística	Traslado del cabrestante a taller 38	Incluido	Uso de grúas y transporte interno
3	Desarme	Desarme completo del cabrestante	150	Incluye eje, pedestales y freno
4	Inspección	Medición dimensional de eje y bocinas	Incluido	Alto desgaste en bocinas de bronce
5	Reparación	Ajustes y correcciones dimensionales	Incluido	Ovalamiento frecuente
6	Armado	Armado completo del cabrestante	200	Reemplazo de bocinas
7	Montaje	Montaje total en el buque	80	Alineación final

Ítem	Etapas	Actividad	HH estimadas	Observaciones
8	Contingencias	Imprevistos y ajustes no planificados	100	Fallas ocultas
		TOTAL, POR CABRESTANTE	600 HH	—

- **Checklist del plan de mejora**

Mantenición mayor cabrestante – Sistema con bocinas Thordon

Frecuencia: cada 15–20 años
 Vida útil del material: bocinas poliméricas Thordon
 Horas-hombre: 600 HH por cabrestante
 Cantidad de cabrestantes: 2

El checklist mantiene las mismas etapas que el sistema actual; la diferencia principal radica en la frecuencia de ejecución, acorde a la mayor vida útil del material.

Checklist de mantención mayor propuesta (Thordon)

Ítem	Etapas	Actividad	HH estimadas	Observaciones
1	Desmontaje	Retiro del cabrestante desde el buque	70	Menor desgaste acumulado
2	Logística	Traslado del cabrestante a taller 38	Incluido	Procedimiento estándar
3	Desarme	Desarme completo del cabrestante	150	Componentes en mejor condición
4	Inspección	Medición dimensional de eje y bocinas	Incluido	Desgaste reducido

Ítem	Etapas	Actividad	HH estimadas	Observaciones
5	Reparación	Ajustes y correcciones dimensionales	Incluido	Poco frecuentes
6	Armado	Armado completo del cabrestante	200	Bocinas poliméricas
7	Montaje	Montaje total en el buque	80	Alineación final
8	Contingencias	Imprevistos y ajustes no planificados	100	Baja probabilidad
		TOTAL, POR CABRESTANTE	600 HH	—

➤ Tabla comparativa clave

Comparación de mantención mayor en 20 años

Concepto	Sistema actual (Bronce)	Propuesta (Thordon)
Checklist	Igual	Igual
HH por overhaul	600 HH	600 HH
Frecuencia de overhaul	Cada 5 años	Cada 15–20 años
Overhaul en 20 años (1 cabrestante)	4	1
HH en 20 años (1 cabrestante)	2.400 HH	600 HH
HH en 20 años (2 cabrestantes)	4.800 HH	1.200 HH
Ahorro total de HH	—	3.600 HH

La implementación de bocinas poliméricas Thordon en los pedestales del cabrestante permite extender significativamente el intervalo entre mantenciones mayores, pasando de una periodicidad de cinco años a un horizonte de entre quince y veinte años. Si bien el checklist de mantención mayor y las horas-hombre requeridas por intervención se mantienen constantes (600 HH por cabrestante), la reducción en la frecuencia de overhaul genera un ahorro acumulado de aproximadamente 3.600 horas-hombre en un período de 20 años, considerando los dos cabrestantes del buque.

Esta disminución en horas-hombre se traduce en menores costos de mantenimiento, menor indisponibilidad operativa y una reducción significativa de la carga de trabajo asociada a mantenciones mayores, fortaleciendo la viabilidad técnica y económica de la mejora propuesta.

3.6.1 CHECKLIST DE PLAN DE MANTENIMIENTO DE LA TRIPULACIÓN

La mantención preventiva del cabrestante hidráulico es realizada de forma periódica por la tripulación del buque, con el fin de asegurar su correcta operación y detectar condiciones anómalas durante la navegación. En la situación actual, estas labores incluyen lubricación manual e inspecciones frecuentes debido al desgaste asociado a las bocinas de bronce. En la propuesta de mejora, la mantención preventiva se enfoca principalmente en la verificación de las condiciones operativas del cabrestante, reduciendo la carga técnica de las intervenciones sin comprometer la seguridad ni la disponibilidad del equipo.

- Mantención preventiva realizada por la tripulación

Situación actual – Bocinas de bronce

Dedicación: 6 horas-hombre semanales

Objetivo: retrasar desgaste y detectar fallas incipientes.

Checklist preventivo actual (Bronce)

Actividad	Frecuencia	HH/semana	Observaciones
Lubricación manual de bocinas y pedestales	Semanal	2,0	Dependencia crítica de grasa

Actividad	Frecuencia	HH/semana	Observaciones
Limpieza general del cabrestante	Semanal	0,75	Eliminación de sal
Inspección visual de eje y pedestales	Semanal	0,75	Detección de corrosión
Termografía en pedestales	Semanal	1,25	Control de fricción
Revisión de ruidos y vibraciones	Semanal	0,75	Indicios de falla
Verificación funcional del freno	Semanal	0,50	Seguridad
TOTAL, SEMANAL		6,0 HH	

A pesar de estas labores, la corrosión del bronce y la interacción eje–bocina en ambiente marino limitan la vida útil efectiva del pedestal a aproximadamente 2,5 años sin intervención correctiva.

➤ Mantenimiento preventiva realizada por la tripulación

Propuesta de mejora – Bocinas poliméricas (Thordon)

Dedicación: 4 horas-hombre semanales

Objetivo: corroborar condiciones operativas óptimas y asegurar confiabilidad.

Checklist preventivo propuesto (Polímero)

Actividad	Frecuencia	HH/semana	Observaciones
Inspección visual general del cabrestante	Semanal	1,0	Control de condición
Limpieza general del equipo	Semanal	0,75	Mantenimiento básica
Verificación funcional a mar abierto	Semanal	1,0	Operación bajo carga
Revisión de ruidos y vibraciones	Semanal	0,75	Control operacional
Inspección visual de pedestales y eje	Semanal	0,50	Sin foco en desgaste
TOTAL, SEMANAL		4,0 HH	

Con bocinas poliméricas no se requiere lubricación manual ni END sistemáticos, y los pedestales no requieren intervención correctiva por un período estimado de 15 a 20 años.

La mantención preventiva realizada por la tripulación presenta diferencias significativas entre la situación actual y la propuesta de mejora. Mientras que el sistema con bocinas de bronce exige una dedicación semanal elevada y controles frecuentes mediante lubricación y END, la incorporación de bocinas poliméricas permite reducir la carga operativa de la tripulación y orientar las tareas preventivas principalmente a la verificación de condiciones operativas. Esta modificación, junto con la extensión de la vida útil de los pedestales, constituye uno de los principales aportes técnicos de la mejora propuesta.

3.7 ANÁLISIS DE RIESGOS ASOCIADOS A LA MEJORA

Toda modificación de diseño incorpora riesgos potenciales que deben ser evaluados y gestionados. En la Tabla 3-X se presentan los principales riesgos identificados y sus respectivas medidas de mitigación.

Riesgo potencial	Causa probable	Medida de mitigación
Desgaste prematuro del eje	Incompatibilidad material o acabado superficial inadecuado	Verificación del material del eje y rugosidad recomendada
Montaje incorrecto del cojinete	Falta de experiencia en materiales poliméricos	Capacitación y procedimiento de montaje estandarizado
Sobrecarga puntual	Desalineación previa del eje	Medición y corrección de alineación antes del montaje
Rechazo operacional	Cambio de práctica tradicional	Capacitación a personal de operación y mantenimiento

La identificación temprana de estos riesgos permite asegurar una implementación segura y efectiva de la mejora.

3.8 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉCNICO–OPERACIONAL DEL CABRESTANTE

3.8.1 Criterio de evaluación adoptado

La evaluación del desempeño del cabrestante no se basa en indicadores clásicos como MTBF o MTTR, debido a la ausencia de registros históricos CMMS confiables. En su lugar, se adopta un enfoque de evaluación técnico–operacional sustentado en evidencia observable, vida útil del componente crítico, carga real de mantenimiento y análisis del riesgo operacional, metodología adecuada para proyectos de ingeniería aplicada.

3.8.2 Componente crítico y modo de falla dominante

El análisis de fallas identifica a las bocinas de bronce de los pedestales como el componente crítico que limita el desempeño del cabrestante. El modo de falla dominante corresponde al desgaste progresivo y corrosión en ambiente marino, lo que conduce a intervenciones mayores del sistema y eleva el riesgo operacional.

3.8.3 Evaluación del desempeño técnico–operacional actual

La siguiente tabla resume la evaluación del desempeño del cabrestante en su condición actual, considerando indicadores técnicos cualitativos basados en evidencia operacional y prácticas reales de mantenimiento.

Evaluación del desempeño actual del cabrestante

Dimensión	Indicador técnico	Evidencia observable	Desempeño actual
Confiabilidad	Vida útil del componente crítico	Recambio de bocinas previo a ciclos prolongados de operación	Limitado
Confiabilidad	Modo de falla dominante	Desgaste y corrosión en pedestales	Recurrente
Mantenibilidad	Tipo de intervención requerida	Desarme mayor para cambio de bocinas	Alta complejidad
Mantenibilidad	Dependencia de lubricación	Engrase manual periódico	Alta
Esfuerzo de mantenimiento	Dedicación de la tripulación	Horas semanales destinadas a engrase	Elevada
Control de condición	Capacidad de detección temprana	Inspección principalmente visual	Baja
Riesgo operacional	Severidad de la falla	Posible daño al eje y detención del sistema	Crítico

3.8.4 Carga de mantenimiento planificado

El funcionamiento del cabrestante depende de actividades de engrase realizadas periódicamente por la tripulación. Estas tareas representan una carga elevada de mantenimiento planificado que, si bien permiten mantener la operatividad, no eliminan el mecanismo de degradación del componente crítico.

3.8.5 Síntesis del desempeño del cabrestante

En la situación actual, el cabrestante presenta una confiabilidad limitada por la vida útil de las bocinas de bronce, alta dependencia de lubricación, mantenimiento de elevada complejidad y un control del estado principalmente reactivo. Estas condiciones justifican la implementación de una mejora orientada a aumentar la confiabilidad y reducir la carga de mantenimiento.

3.8.6 Evaluación comparativa del desempeño operacional del cabrestante

Criterio de comparación

La comparación del desempeño operacional del cabrestante se realiza entre la configuración actual con bocinas de bronce y la configuración propuesta con cojinetes poliméricos, utilizando indicadores técnicos cualitativos basados en evidencia operacional, prácticas reales de mantenimiento y comportamiento esperado del material en ambiente marino.

Comparación del desempeño técnico–operacional

En la siguiente tabla presenta la comparación directa entre ambas configuraciones, considerando confiabilidad, mantenibilidad, esfuerzo de mantenimiento, control de condición y riesgo operacional.

Comparación del desempeño operacional del cabrestante

Dimensión	Indicador técnico	Bocinas de bronce (actual)	Cojinetes poliméricos (propuesto)
Confiabilidad	Vida útil del componente crítico	Limitada por desgaste y corrosión	Extendida por resistencia al ambiente marino
Confiabilidad	Modo de falla dominante	Desgaste acelerado y corrosión	Desgaste controlado
Mantenibilidad	Tipo de intervención	Desarme mayor y ajuste fino	Intervención simplificada
Mantenibilidad	Dependencia de lubricación	Alta y permanente	Nula o mínima
Esfuerzo de mantenimiento	Actividad principal de la tripulación	Engrase periódico	END y verificación de condición
Esfuerzo de mantenimiento	Carga operativa	Elevada	Reducida
Control de condición	Capacidad de detección temprana	Baja (reactiva)	Alta (basada en condición)

Dimensión	Indicador técnico	Bocinas de bronce (actual)	Cojinetes poliméricos (propuesto)
Riesgo operacional	Severidad de la falla	Alta, con riesgo de daño al eje	Baja, falla progresiva y controlable

Análisis comparativo

En la configuración actual, el desempeño del cabrestante se encuentra limitado por la vida útil de las bocinas de bronce, lo que genera alta dependencia de la lubricación y una carga significativa de mantenimiento rutinario. El control del estado del componente es principalmente reactivo, aumentando el riesgo operacional.

La configuración propuesta con cojinetes poliméricos permite reducir los mecanismos de degradación asociados a la corrosión y fricción, simplificar las tareas de mantenimiento y cambiar el enfoque hacia un mantenimiento basado en condición. Esto se traduce en una mejora esperada de la confiabilidad y una reducción del esfuerzo operativo de la tripulación.

3.9 ESCALABILIDAD DE LA MEJORA PROPUESTA

La solución planteada no se limita exclusivamente al cabrestante hidráulico del buque Cabo Vírgenes. La mejora es escalable y replicable en otros cabrestantes de características similares, especialmente en buques mercantes que operan en ambientes marinos agresivos y presentan altos ciclos de fondeo y amarre.

En este sentido, la implementación de cojinetes poliméricos en pedestales puede considerarse una mejora estándar de diseño aplicable a flotas completas, contribuyendo a una reducción sostenida de costos de mantenimiento y a un aumento global de la confiabilidad operativa.

3.10 SÍNTESIS DE LA PROPUESTA DE MEJORA

La propuesta desarrollada en este capítulo permite concluir que la sustitución de los bujes de bronce por cojinetes poliméricos de alto desempeño constituye una solución técnicamente

sólida, económicamente justificable y alineada con las mejores prácticas de mantenimiento moderno.

Al abordar directamente la causa raíz de las fallas identificadas, la mejora propuesta permite aumentar la vida útil del sistema, reducir las paradas no programadas, optimizar los recursos de mantenimiento y mejorar la seguridad durante las maniobras críticas del buque.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.1 **OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA**

El presente capítulo tiene por objetivo evaluar económicamente la mejora propuesta para los dos cabrestantes hidráulicos de fondeo del buque *Cabo Virgenes*, consistente en la sustitución de bocinas de bronce por bocinas poliméricas Thordon ThorPlas-Blue.

La evaluación se desarrolla mediante un análisis del Costo Total de Propiedad (Total Cost of Ownership, TCO) con un enfoque incremental, considerando un horizonte de 20 años de operación, e incorporando los costos directos asociados al recambio de bocinas y los costos operacionales derivados de las actividades de engrase, monitoreo y mantenimiento realizadas por la tripulación.

4.2 **CONDICIONES OPERATIVAS REALES Y SUPUESTOS DEL ANÁLISIS**

El sistema de fondeo del buque está compuesto por dos cabrestantes hidráulicos, ubicados a babor y estribor, los cuales operan bajo condiciones marítimas y climáticas severas, caracterizadas por presencia permanente de agua salada, contaminación abrasiva y cargas dinámicas variables.

Debido a estas condiciones, los pedestales del cabrestante presentan un desgaste acelerado, especialmente cuando se emplean bocinas metálicas con alta dependencia de lubricación.

Para el análisis económico se consideran los siguientes supuestos:

- Número de cabrestantes: 2
- Pedestales por cabrestante: 8
- Total, de bocinas del sistema: 16
- Horizonte de evaluación: 20 años
- Ingreso a dique seco: cada 5 años (independiente del tipo de bocina)
- Vida útil real bocinas de bronce: máximo 2,5 años, con operación alternada
- Vida útil bocinas Thordon ThorPlas-Blue: 15–20 años
- Número de recambios de bocinas en 20 años:
 - Bronce: 4 recambios completos
 - Thordon: 1 instalación inicial

4.3 COSTOS DE MATERIALES

Costo unitario de bocinas

Material	Costo unitario (USD)
Bocina de bronce	\$100
Bocina Thordon ThorPlas-Blue	\$900

Tabla 4-1. Costo unitario de bocinas

Costo de bocinas por recambio

Material	Cantidad	Costo total por evento (USD)
Bronce	16	\$1.600
Thordon ThorPlas-Blue	16	\$14.400

Tabla 4-2. Costo de bocinas por evento

*Cada intervención considera el recambio de **16 bocinas**.*

4.4 COSTOS INCREMENTALES ASOCIADOS AL RECAMBIO DE BOCINAS

Los siguientes costos corresponden exclusivamente a las actividades necesarias para el recambio de bocinas, excluyendo el costo base de estadía en dique seco, el cual se realiza periódicamente por otros motivos de mantenimiento del buque.

Mano de obra especializada

- Horas hombre por cabrestante: **600 HH**
- Total, para dos cabrestantes: **1.200 HH**
- Costo por hora hombre: **USD 40**

➤ **Costo total mano de obra por evento:**
USD 48.000

Equipos auxiliares

Equipo	Tarifa (USD/h)	Horas totales	Costo total (USD)
Grúa terrestre 200 t	180	40	\$7.200
Remolque	60	6	\$360
Total, equipos por evento			\$7.560

Tabla 4-3. Costo de equipos auxiliares por evento

Costo incremental total por recambio

Ítem	Costo (USD)
Mano de obra especializada	\$48.000
Grúa terrestre	\$7.200
Remolque	\$360
Bocinas de bronce	\$1.600
Costo incremental total por evento	\$57.160

Tabla 4-4. Costo incremental por evento (sin dique)

En la evaluación económica presentada en la Tabla 4.4, no se considera el costo asociado al ingreso a dique seco como una variable diferenciadora entre la situación actual y la propuesta de mejora. Esto se debe a que, de acuerdo con la normativa vigente y los requisitos de certificación del buque, el ingreso a dique seco se realiza de manera obligatoria cada cinco años, independientemente del estado del cabrestante hidráulico o de los materiales utilizados en sus componentes.

En consecuencia, tanto en la situación actual como en la propuesta de mejora, el buque incurre en el mismo número de ingresos a dique durante el horizonte de evaluación. La diferencia técnica y económica radica exclusivamente en el **alcance de las intervenciones realizadas durante el período de dique**. En el sistema actual, con bocinas de bronce, el cabrestante requiere mantención correctiva en cada ciclo de cinco años, lo que implica desmontaje, desarme y reparación del equipo. En cambio, con la implementación de bocinas poliméricas Thordon, el

cabrestante no requeriría intervención correctiva en dichos ciclos, limitándose únicamente a labores de mantención preventiva.

Por lo anterior, el análisis económico se enfoca en la comparación de las horas-hombre, costos de intervención y pérdida de disponibilidad asociadas directamente al cabrestante, excluyendo el costo del dique seco por tratarse de un costo fijo e inevitable para ambas alternativas.

4.5 ESCENARIO ACTUAL: BOCINAS DE BRONCE

Las bocinas de bronce presentan una alta dependencia de lubricación y una vida útil limitada a aproximadamente 2,5 años, lo que obliga a operar los cabrestantes de forma alternada y a realizar el recambio completo de bocinas en cada ingreso a dique seco.

4.5.1 Costo incremental acumulado – Bocinas de bronce (20 años)

En un horizonte de 20 años, se realizan 4 recambios completos.

Concepto	Valor
Número de recambios	4
Costo incremental por evento (USD)	\$57.160
Costo incremental total (USD)	\$228.640

Tabla 4-5. Costo incremental total – Bocinas de bronce

4.6 ESCENARIO PROPUESTO: BOCINAS THORDON THORPLAS-BLUE

Las bocinas Thordon ThorPlas-Blue están diseñadas para operar con baja o nula lubricación, presentan elevada tolerancia a la contaminación marina y una vida útil estimada entre 15 y 20 años, por lo que no requieren recambios periódicos dentro del horizonte de evaluación.

4.6.1 Costo incremental asociado a bocinas Thordon (20 años)

Ítem	Costo (USD)
Bocinas Thordon (16 unidades)	\$14.400
Mano de obra asociada (1 evento)	\$48.000
Grúa terrestre	\$7.200
Remolque	\$360
Costo incremental total	\$69.960

Tabla 4-6. Costo incremental – Bocinas Thordon

4.7 **COMPARACIÓN ECONÓMICA INCREMENTAL (20 AÑOS)**

Escenario	Costo incremental total (USD)
Bocinas de bronce	\$228.640
Bocinas Thordon ThorPlas-Blue	\$69.960
Ahorro incremental directo	\$158.680 USD

Tabla 4-7. Comparación de costos incrementales atribuibles a la mejora

4.8 **IMPACTO OPERATIVO Y AHORRO POR REDUCCIÓN DE ENGRASE Y MONITOREO**

1. Escenario actual

En el esquema actual con bocinas de bronce, el sistema de pedestales requiere engrase cada 2 días para cada una de las 16 bocinas. Si bien el diseño contempla un sistema de engrase hidráulico mediante cañerías, en la práctica este presenta fallas recurrentes debido a obstrucciones causadas por contaminación marina, lo que obliga a la tripulación a realizar engrase manual adicional.

Considerando un escenario realista, se estima que estas actividades representan en promedio 4 horas hombre semanales adicionales dedicadas exclusivamente al sistema de cabrestantes.

- Horas anuales:
6 HH/semana $\times$ 52 semanas = **312 HH/año**
- Horas adicionales en 20 años:
 $312 \times 20 = \mathbf{6.240\ HH}$
- Costo asociado (USD 40/HH): **USD 249.600**
- Ahorro por reducción 80%: $249.600 \times 0,80 = \mathbf{USD\ 199.680}$

Con la implementación de bocinas Thordon ThorPlas-Blue, se estima una reducción aproximada del **80%** de estas actividades.

Ahorro operacional estimado en 20 años:
USD \$199.680

Con la implementación de bocinas Thordon ThorPlas-Blue, se elimina la dependencia del sistema de engrase por cañerías, reduciendo la exposición a fallas por obstrucción y eliminando la necesidad de engrase manual frecuente por parte de la tripulación.

4.9 EVALUACIÓN ECONÓMICA INTEGRAL DE LA MEJORA

Concepto	Ahorro estimado (USD)
Ahorro incremental por menor recambio	\$158.680
Ahorro operacional por menor engrase y monitoreo	\$199.680
Ahorro económico total estimado	\$358.360 USD

Tabla 4-8. Resumen del ahorro económico total (20 años)

4.10 CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica desarrollada demuestra que la sustitución de bocinas de bronce por bocinas poliméricas Thordon ThorPlas-Blue en los cabrestantes hidráulicos del buque *Cabo Virgenes* constituye una mejora técnica, operacional y económicamente altamente conveniente.

Considerando un horizonte de 20 años, la reducción en la frecuencia de recambios, el menor uso de mano de obra especializada y equipos auxiliares, junto con la disminución significativa de

tareas de engrase y monitoreo intensivo realizadas por la tripulación, permiten estimar un ahorro económico total del orden de USD 358.000, además de una mejora sustancial en confiabilidad, disponibilidad y seguridad operacional.

Desde una perspectiva de mantenimiento basado en confiabilidad y gestión del ciclo de vida de activos, la mejora propuesta se encuentra plenamente justificada y se recomienda su implementación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del presente proyecto permitió analizar de manera integral el comportamiento operacional del cabrestante hidráulico de fondeo del buque *Cabo Virgenes*, identificando como principal punto crítico los pedestales que soportan el eje principal del sistema, específicamente las bocinas de bronce actualmente instaladas. A través de la aplicación de herramientas de análisis de fallas, tales como el diagrama de Pareto, el diagrama de Ishikawa y el análisis de causa raíz, se logró determinar que las fallas recurrentes no se deben únicamente a prácticas operativas o de mantenimiento, sino a una limitación inherente del material frente a las condiciones reales de operación en ambiente marino.

El análisis técnico desarrollado en el Capítulo 3 demostró que, si bien las bocinas de bronce poseen capacidad estructural suficiente desde el punto de vista teórico, su alta dependencia de lubricación, su sensibilidad a la contaminación marina y su limitado comportamiento frente a cargas dinámicas provocan un desgaste acelerado y una disminución significativa de la confiabilidad del sistema. En este contexto, la propuesta de sustitución por bocinas poliméricas Thordon ThorPlas-Blue se presenta como una solución técnicamente sólida, alineada con los principios del mantenimiento moderno y la gestión de activos basada en confiabilidad.

Desde el punto de vista económico, el análisis incremental desarrollado en el Capítulo 4 permitió demostrar que el mayor impacto de la mejora no se encuentra en el costo unitario del componente, sino en la reducción de recambios, en el menor uso de mano de obra especializada y equipos auxiliares, y en la disminución significativa de actividades operativas de engrase y monitoreo realizadas por la tripulación. Considerando un horizonte de 20 años, la mejora propuesta permite estimar un ahorro económico relevante, además de un aumento sustancial en la disponibilidad y seguridad operacional del sistema.

Un aspecto especialmente relevante de esta mejora es la reducción de la carga operativa sobre la tripulación. El sistema actual con bocinas de bronce exige engrases frecuentes, inspecciones constantes y acciones correctivas recurrentes debido a fallas del sistema de lubricación y a las severas condiciones marítimas. La implementación de bocinas poliméricas permite eliminar gran parte de estas tareas, optimizando el uso del recurso humano a bordo y reduciendo el riesgo de fallas inesperadas durante maniobras críticas de fondeo y amarre.

En función de los resultados obtenidos, se concluye que la sustitución de bocinas de bronce por bocinas poliméricas Thordon ThorPlas-Blue constituye una mejora técnica, económica y operacionalmente justificada, que permite aumentar la confiabilidad del cabrestante, reducir los costos asociados al mantenimiento correctivo y mejorar la seguridad del sistema en el largo plazo.

Recomendaciones

En base al análisis realizado, se recomienda:

- Implementar la sustitución de bocinas de bronce por bocinas poliméricas Thordon ThorPlas-Blue durante el próximo ingreso a dique seco del buque.
- Integrar la mejora propuesta al plan de mantenimiento del cabrestante, ajustando los programas de lubricación y monitoreo de condición en función del nuevo material.
- Mantener un registro sistemático de parámetros operativos (temperatura, vibraciones y holguras) durante los primeros años de operación, con el fin de validar en terreno los beneficios esperados de la mejora.
- Evaluar la replicabilidad de esta solución en otros cabrestantes de características similares dentro de la flota, como una mejora estándar de diseño para operaciones en ambientes marinos severos.
- Considerar, a futuro, el uso de criterios de mantenimiento basado en confiabilidad desde la etapa de diseño y selección de materiales, con el objetivo de reducir fallas recurrentes y optimizar el ciclo de vida de los equipos.

Finalmente, este proyecto representa no solo una propuesta de mejora técnica para un sistema específico, sino también una experiencia formativa relevante en el ámbito de la ingeniería de mantenimiento, permitiendo aplicar conocimientos teóricos a un caso real, con impacto directo en la operación, la seguridad y la eficiencia de un activo industrial crítico.

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN

Parte de la información técnica y operativa utilizada en este estudio fue obtenida a partir de manuales del fabricante y de la experiencia práctica proporcionada por personal técnico de ASMAR, en el marco de labores de mantenimiento y operación de cabrestantes navales.

Aicrane. (s. f.). *¿Cómo funciona un cabrestante de barco?*

<https://aicraneliftingsolution.com/es/winch/how-does-a-boat-winch-work/>

Anaya Fuentes, G. E. (2024). *Definición del proyecto (Ishikawa y Pareto)*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstreams/a1ec2c36-2884-4b66-9bb9-c056f04e886f/download>

ASMAR Talcahuano. (2025a). *Historial de fallas y registros de inactividad del cabrestante hidráulico TTS Marine 76-U3 (2023-2025)*. Documento técnico interno, Taller 38, Talcahuano, Chile.

ASMAR Talcahuano. (2025b). *Protocolo de Overhaul y mantenimiento mayor para maquinaria de cubierta*. Manual de procedimientos internos, Planta Industrial Talcahuano, Chile.

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. (s. f.). *Winch*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/winch>

Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., & KOCKS GmbH. (2004). *Working instruction for combined anchor- and mooring winch: Type 1906-8818/20 and mooring winch Type 8818/20, central system hydraulic (CSH)*. Documento técnico del fabricante.

Fernandez-Gomez, T., Ramirez-Rodriguez, R. R., Miranda-Sanchez, F. J., & Merino-Rosas, I. C. (2019). Técnicas de mantenimiento. *Revista de Ingeniería Industrial*, 3(8), 6-13.

https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Industrial/vol3num8/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_Industrial_V3_N8_2.pdf

Fracttal. (s. f.). *Diagrama de Pareto en mantenimiento: Qué es y cómo se aplica.*

<https://www.fracttal.com/es/blog/diagrama-de-pareto-en-mantenimiento>

Henríquez, A. (2024, 31 de octubre). *Análisis de Causa Raíz (ACR): Principios básicos, beneficios y pasos.* Inspenet. <https://inspenet.com/articulo/principios-basicos-analisis-de-causa-raiz/>

Lifeder. (s. f.). *Evolución del mantenimiento industrial: Historia y etapas.*

<https://www.lifeder.com/evolucion-mantenimiento-industrial/>

Thordon Bearings Inc. (2022). *Thordon SXL and ThorPlas-Blue bearings: Technical data and marine applications.* <https://thordonbearings.com/marine/merchant-marine>

Tractian. (2025, 3 de junio). *Análisis de causa raíz aplicado al mantenimiento preventivo.*

<https://tractian.com/es/blog/analisis-de-causa-raiz-aplicado-al-mantenimiento-preventivo>

Trejo, E. (2024, 10 de diciembre). *Análisis de causa raíz (RCA) aplicado al mantenimiento industrial.* Inspenet. <https://inspenet.com/articulo/aplicacion-analisis-causa-raiz/>

VEVOR. (s. f.). *¿Qué es un cabrestante? Una guía completa.* Blog VEVOR.

<https://www.vevor.com/es/diy-ideas/what-is-a-winch/>