

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL REEMPLAZO DE
BUJES METALICOS POR BUJES POLIMERICOS EN EQUIPOS NAVALES DE
CUBIRETA**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial con
licenciatura en Ingeniería.

Alumno:
Juan Esteban Irribarra Castillo

Profesor Guía:
Guillermo Felipe Larson Muñoz

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: Analisis de factibilidad tecnica y economica del reemplazp de bujes metalicos por bujes polimericos en equipos navales de cubierta.

Nombre del candidato(a): Juan Esteban Iribarra Castillo

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento industrial, con Licenciatura en Ingeniería

Campus: Concepcion ; **Departamento:** Mecanica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Guillermo Felipe Larson Muñoz, 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: 12/01/2026

Firma:

16.010.187-3

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/01/2026

Firma:

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

RESUMEN

El presente proyecto de título tiene como finalidad evaluar y ejecutar el reemplazo de bujes metálicos por bujes de polímero Thordon y Vesconite en los equipos de cubierta de unidades navales, tales como pescantes, roldanas y mecanismos de izado. El estudio surge a partir de la necesidad de mejorar el desempeño y la confiabilidad de los sistemas mecánicos sometidos a condiciones severas de operación y exposición al ambiente marino, donde la corrosión y el desgaste acelerado de los bujes metálicos generan elevados costos de mantenimiento y frecuentes detenciones operativas.

Para abordar esta problemática, se realiza un análisis comparativo entre los bujes metálicos actualmente utilizados y los bujes de polímero de ingeniería Thordon ThorPlas así como el Vesconite XL, considerando propiedades mecánicas, resistencia al desgaste, coeficiente de fricción, tolerancias dimensionales, compatibilidad con ejes metálicos y comportamiento frente a la humedad y la salinidad. Asimismo, se evalúa la factibilidad técnica del cambio mediante comparativa de propiedades mecánicas, mediciones dimensionales, ensayos de ajuste y análisis de interferencia, además de un estudio económico que contempla los costos de adquisición, instalación y mantenimiento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
Objetivo general:	2
Objetivos específicos:	2
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	6
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.	6
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.	6
1.4 BENEFICIOS DEL PROYECTO.....	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Mantenimiento	11
2.1.1 Tipos de mantenimiento.....	11
2.2 Indicadores de confiabilidad.....	12
2.2.1 Tiempo medio entre fallas (MTBF)	12
2.2.2 Tiempo medio para fallar (MTTF).....	13
2.2.3 Tiempo medio de reparación (MTTR)	13
2.2.4 Confiabilidad	14
2.2.5 Disponibilidad	14
2.2.6 Mantenibilidad	14
2.3 Herramientas de análisis causa raíz	15
2.3.1 Diagrama de Ishikawa	15
2.3.2 Método 5 porque.....	15
2.4 Equipos de cubierta	15
2.4.1 Escotillas.....	15
2.4.2 Pescantes.....	16
2.4.3 Poleas.....	16
2.5 Bujes	16
2.6 Polímero.....	17
2.7 Costo del ciclo de vida (life cycle cost LCC)	17
CAPÍTULO III: DISEÑO Y SOLUCIÓN.....	19

3.1	Diagrama de Ishikawa	21
3.2	Método de los 5 porque.....	21
3.3	Comparación técnica Bronce v/s Thordon / Vesconite	22
3.3.1	Bronce CDA 905	22
3.3.2	Vesconite.....	23
3.3.3	Thordon.....	26
3.4	Ingeniería de diseño para la fabricación de los bujes.....	30
3.4.1	Bronce CDA 905	30
3.4.2	Vesconite.....	31
3.4.3	Thordon.....	32
3.5	Métodos de instalación de bujes.....	34
3.5.1	Bronce CDA 905	34
3.5.2	Vesconite.....	35
3.5.3	Thordon.....	37
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN ECONÓMICA		43
4.1	Análisis LCC.....	45
4.1.1	Costo inicial del material.....	45
4.1.2	Costo por montaje	46
4.1.3	Costo por mecanizado del material.....	48
4.1.4	Costo de lubricación	49
4.1.5	Costo de mantenimiento preventivo	49
4.1.6	Resultados LCC.....	49
CONCLUSION		52
BIBLIOGRAFIA		52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1-1 Diagrama de Ishikawa.....	21
Figura 3.3-1 Composición química bronce CDA 905.....	22
Figura 3.3-2 Propiedades mecánicas bronce CDA 905.....	22
Figura 3.3-3 Propiedades físicas bronce CDA 905.....	23
Figura 3.3-4 Propiedades físicas Vesconite.	24
Figura 3.3-5 Test de fricción sin grasa.	25
Figura 3.3-6 Resistencia química Vesconite.	26
Figura 3.3-7 Propiedades físicas Thorplas.....	27
Figura 3.3-8 Propiedades químicas Thorplas.....	28
Figura 3.3-9 Comparación de desgaste.....	29
Figura 3.4-1 Diseño de buje.	31
Figura 3.4-2 Diseño de buje.	31
Figura 3.4-3 Diseño de buje.	32
Figura 3.4-4 Diseño de buje.	32
Figura 3.4-5 Diseño de buje.	33
Figura 3.4-6 Diseño de buje.	33
Figura 3.5-1 Instalación buje.....	35
Figura 3.5-2 Buje sumergido en hielo seco.....	36
Figura 3.5-3 Buje enfriado por nitrógeno líquido.	37
Figura 3.5-4 Pines anti rotatorios.....	38
Figura 3.5-5 Pines anti rotatorios.....	39
Figura 3.5-6 Instalación buje.....	40
Figura 3.5-7 Enfriamiento por nitrógeno líquido.	41
Figura 4.1-1 Valor buje Thorplas.....	45
Figura 4.1-2 Valor buje Vesconite.	45
Figura 4.1-3 Valor bronce CDA 905.	46
Figura 4.1-4 Densidad bronce CDA 905.	46
Figura 4.1-5 Formatos venta hielo seco.	48
Figura 4.1-6 Costo de bujes en el tiempo.....	51

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 3.4-1 Interferencias para ajustes de apriete.	30
Tabla 4.1-1 Costo de materiales.	51

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

NR	:	Numero Registrado.
SAE	:	Society of Automotive Engineers.
CDA	:	Copper Development Association.
ASTM	:	America Society for Testing and Materials.
IACS	:	International Annealed Copper Standard.
BTU	:	British Thermal Unit.
CLP	:	Peso Chileno.
%	:	Porcentaje.
°C	:	Grados Centigrados.
°F	:	Grados Farenheit.
°K	:	Grados Kelvin.
ksi	:	Kilo-pound per square inch.
psi	:	Pound per square inch.
MPa	:	Megapascal.
BHN	:	Brinell Hardness Number.
Pulg	:	Pulgada.
cm	:	Centimetro.
mm	:	Milímetro.
Lb	:	Libra.
In	:	Inch.
SQ	:	Square.
ft	:	Feet.
hr	:	Hora.
RPM	:	Revoluciones Por Minuto.
TONS	:	Toneladas.
kg	:	Kilogramos.
G	:	Gramos.
Ø	:	Diametro.
HH	:	Horas Hombre.
L	:	Litros.
sec	:	Segundos.
OD	:	Outer Diameter.
J	:	Joule.
Mrads	:	Millirads.
W	:	Watts.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, las estrategias de mantenimiento industrial han evolucionado en función de las necesidades tecnológicas y productivas de cada época. Durante la primera generación del mantenimiento, que abarca desde la Revolución Industrial hasta la Primera Guerra Mundial, la industria se caracterizaba por el uso de equipos simples y sobredimensionados, donde las fallas no generaban grandes pérdidas económicas. En consecuencia, las labores de mantenimiento se limitaban a tareas correctivas, tales como limpieza, engrase y sustitución de piezas dañadas.

Con el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial y el aumento de la demanda de producción industrial, surgió la necesidad de mantener los equipos en funcionamiento continuo. En este contexto, se introdujeron los primeros conceptos de mantenimiento preventivo, con el objetivo de reducir las fallas imprevistas y aumentar la disponibilidad operativa de los equipos. Décadas más tarde, la incorporación de la instrumentación, el análisis de datos y las tecnologías predictivas permitió dar paso al mantenimiento basado en confiabilidad, enfoque que busca maximizar la eficiencia de los activos y prolongar su vida útil a través de una gestión sistemática.

En el ámbito naval, la aplicación de estrategias de mantenimiento eficientes es de vital importancia, ya que los sistemas mecánicos de los buques operan bajo condiciones extremas de carga, humedad, salinidad y exposición al ambiente marino. Elementos como los bujes, utilizados en pescantes, roldanas, grúas menores y otros equipos de cubierta, son componentes críticos que sufren desgaste acelerado debido a la fricción y la falta de lubricación, especialmente cuando están fabricados con materiales metálicos convencionales.

Esta situación genera costos elevados de mantenimiento, frecuentes reemplazos de piezas y riesgo de fallas operativas durante maniobras. Por esta razón, en los últimos años la industria naval ha orientado sus esfuerzos hacia el uso de materiales poliméricos de alto desempeño, capaces de operar sin lubricación, resistir ambientes corrosivos y mantener estabilidad dimensional. Entre estos materiales, los bujes Thordon y Vesconite se han posicionado como una alternativa tecnológica destacada, al ofrecer bajo coeficiente de fricción, excelente resistencia mecánica y ausencia total de corrosión.

El presente proyecto se enmarca en esta línea de innovación, proponiendo la sustitución de bujes metálicos por bujes de polímero Thordon y Vesconite en equipos de cubierta de buques construidos o mantenidos por ASMAR.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar la factibilidad técnica y económica del reemplazo de bujes metálicos por bujes poliméricos en equipos navales de cubierta.

Objetivos específicos:

- Analizar las propiedades mecánicas de distintos materiales poliméricos.
- Comparar el desempeño entre bujes metálicos y poliméricos en condiciones operativas similares.
- Calcular los costos de fabricación, instalación y mantenimiento de ambas alternativas.
- Determinar la vida útil proyectada y los beneficios económicos del cambio.

CAPÍTULO I:
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO.

En la industria naval, el uso de bujes metálicos principalmente de bronce o acero ha sido una práctica tradicional debido a su resistencia mecánica y durabilidad. Sin embargo, en ambientes marinos, estos materiales se ven expuestos a condiciones extremas que favorecen la corrosión, el desgaste abrasivo y la pérdida de material por falta o contaminación del lubricante. En los sistemas de cubierta los bujes metálicos deben ser reemplazados periódicamente, generando costos elevados en repuestos y mano de obra, además de tiempos de inactividad operativa que impactan directamente en la disponibilidad de los equipos. En los últimos años, la incorporación de materiales poliméricos auto lubricantes ha demostrado buenos resultados en aplicaciones industriales similares, gracias a su baja fricción, resistencia a la corrosión y menor requerimiento de mantenimiento. Esto ha despertado el interés por evaluar su desempeño en entornos navales, donde las exigencias son mayores y la fiabilidad de los componentes es crítica.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

El presente proyecto consiste en analizar la viabilidad técnica y operativa del reemplazo de bujes metálicos por bujes de polímero auto lubricante en componentes mecánicos utilizados en buques que se encuentran bajo mantenimiento en ASMAR. Para ello, se realizará una evaluación comparativa entre ambos tipos de bujes, considerando aspectos como resistencia al desgaste, coeficiente de fricción, comportamiento frente a la corrosión, costo de mantenimiento y facilidad de instalación. El estudio busca establecer condiciones óptimas de operación y compatibilidad de materiales, determinando si los bujes poliméricos pueden cumplir con los requerimientos técnicos exigidos por las normas navales y las condiciones reales de servicio.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

El reemplazo de bujes metálicos por bujes de polímero se justifica por la necesidad de reducir costos de mantenimiento, aumentar la vida útil de los componentes y

mejorar la eficiencia operativa en los sistemas mecánicos navales. Los polímeros modernos presentan propiedades tribológicas avanzadas que permiten su uso en aplicaciones de alta carga y fricción sin necesidad de lubricación constante, lo que además disminuye el riesgo de contaminación ambiental por fugas de grasa o aceite así también como posibles accidentes por ir a lubricar manualmente los sistemas. Asimismo, el proyecto aporta valor a la gestión de mantenimiento industrial al promover soluciones tecnológicas sostenibles, alineadas con los objetivos de eficiencia y responsabilidad ambiental de la empresa.

1.4 BENEFICIOS DEL PROYECTO.

Reducción de costos de mantenimiento al disminuir la frecuencia de recambio y lubricación de los bujes. Aumento de la disponibilidad operativa de los equipos, al reducir tiempos de parada por fallas o mantenimiento. Mayor durabilidad de los componentes, gracias a la resistencia de los polímeros a la corrosión marina. Mejora de las condiciones ambientales, al eliminar o reducir el uso de lubricantes contaminantes. Contribución a la innovación tecnológica en mantenimiento naval, mediante la implementación de materiales de nueva generación.

CAPÍTULO II:
MARCO TEÓRICO

2.1 Mantenimiento

El mantenimiento se define como el conjunto de actividades orientadas a conservar o restablecer un activo físico a una condición en la cual pueda cumplir la función para la que fue diseñado, bajo condiciones operacionales determinadas. (Kardec & Nascif, 2002).

Además, el mantenimiento no solo comprende acciones técnicas, sino también actividades administrativas y de gestión, cuyo objetivo es asegurar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los activos durante todo su ciclo de vida. (Moubray, 1997).

Desde una perspectiva de gestión de activos, el mantenimiento cumple un rol estratégico dentro de la organización, contribuyendo a la optimización de costos, reducción de riesgos y sostenibilidad de las operaciones. (ISO 55000, 2014).

2.1.1 Tipos de mantenimiento

2.1.1.1 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo corresponde al conjunto de actividades realizadas después de que ocurre una falla, con el objetivo de restaurar la función operativa de un equipo, sistema o componente. Este tipo de mantenimiento puede ser no planificado, cuando la intervención es inmediata tras la falla, o planificado, cuando se permite postergar la reparación sin afectar significativamente la operación. (Kardec & Nascif, 2002).

Desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, el mantenimiento correctivo suele implicar mayores costos indirectos, debido a paradas no programadas, pérdidas de producción y riesgos operacionales, por lo que se considera una estrategia reactiva frente a la confiabilidad de los activos. (Moubray, 1997).

2.1.1.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se define como el conjunto de acciones programadas y sistemáticas, realizadas a intervalos predeterminados de tiempo o uso, con el fin de reducir la probabilidad de falla y prolongar la vida útil de los equipos. Estas actividades incluyen inspecciones, ajustes, lubricación y reemplazo periódico de componentes. (Mobley, 2002).

Este tipo de mantenimiento busca aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los activos, aunque puede generar intervenciones innecesarias si los intervalos no están correctamente definidos, lo que hace indispensable una adecuada planificación basada en la criticidad del equipo. (Dhillon, 2002).

2.1.1.3 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo consiste en la aplicación de técnicas de monitoreo de condición para evaluar el estado real de los equipos durante su operación, permitiendo predecir fallas antes de que ocurran. Entre estas técnicas se incluyen el análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido y análisis de lubricantes. (Mobley, 2002).

Este enfoque permite optimizar los recursos de mantenimiento, ya que las intervenciones se realizan solo cuando los indicadores muestran una degradación real, contribuyendo a la reducción de costos, aumento de la confiabilidad y mejora de la seguridad operacional. (ISO 55000, 2014).

2.2 Indicadores de confiabilidad

2.2.1 Tiempo medio entre fallas (MTBF)

El MTBF es un indicador de confiabilidad utilizado en equipos reparables, que representa el tiempo promedio de operación transcurrido entre fallas consecutivas. (Moubray, 1997).

Este indicador es ampliamente empleado para evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento y comparar el desempeño de equipos similares dentro de un mismo

sistema.

(Smith & Hinchcliffe, 2004).

Un incremento del MTBF generalmente se asocia a mejoras en la confiabilidad del equipo y en la calidad del mantenimiento aplicado. (Dhillon, 2002).

2.2.2 Tiempo medio para fallar (MTTF)

El MTTF corresponde al tiempo medio hasta la ocurrencia de una falla en componentes no reparables, siendo un parámetro clave para la estimación de la vida útil del activo. (Rausand & Høyland, 2004).

Este indicador es ampliamente utilizado en estudios de confiabilidad y en la selección de componentes, permitiendo definir políticas de reemplazo y gestión del ciclo de vida.

(Ebeling, 2010).

2.2.3 Tiempo medio de reparación (MTTR)

El MTTR (Mean Time To Repair) se define como el tiempo promedio requerido para restaurar un equipo o sistema a condiciones operativas después de que ocurre una falla, considerando todas las actividades asociadas a la intervención de mantenimiento, tales como diagnóstico, reparación, reemplazo de componentes, pruebas y puesta en servicio. (Ebeling, 2010).

En el ámbito naval, el MTTR adquiere especial relevancia debido a las restricciones operativas, limitaciones de acceso y condiciones ambientales propias de los buques, donde una reducción en el tiempo de reparación puede impactar directamente en la continuidad de las operaciones y en la seguridad de la nave. (ABS, 2020).

2.2.4 Confiabilidad

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un sistema, equipo o componente desempeñe la función requerida sin fallar, bajo condiciones específicas de operación y durante un período de tiempo determinado. (ISO 9000, 2015).

Este concepto es fundamental en la ingeniería de mantenimiento, ya que permite analizar el comportamiento de fallas de los activos y apoyar la toma de decisiones relacionadas con el diseño, operación y mantenimiento de los sistemas. (Rausand & Høyland, 2004).

2.2.5 Disponibilidad

La disponibilidad se define como la probabilidad de que un sistema, equipo o componente se encuentre en condiciones operativas y disponible para su uso cuando se requiere, considerando tanto la ocurrencia de fallas como los tiempos asociados a su reparación. Este indicador refleja directamente el impacto del mantenimiento sobre la continuidad operacional. (Ebeling, 2010).

Desde el punto de vista cuantitativo, la disponibilidad depende principalmente de la confiabilidad del equipo (MTBF) y de la mantenibilidad del sistema (MTTR), pudiendo expresarse como la relación entre el tiempo efectivo de operación y el tiempo total considerado. (Rausand & Høyland, 2004).

2.2.6 Mantenibilidad

La mantenibilidad corresponde a la capacidad de un equipo o sistema para ser restaurado a condiciones operativas dentro de un tiempo determinado, cuando se realiza el mantenimiento bajo condiciones específicas, utilizando procedimientos, herramientas y personal adecuados. (ISO 55000, 2014).

Este concepto está estrechamente relacionado con aspectos de diseño, tales como la accesibilidad, modularidad, estandarización de componentes y facilidad de desmontaje, los cuales influyen directamente en la duración de las intervenciones de

mantenimiento y en la reducción del tiempo fuera de servicio. (Dhillon, 2002).

2.3 Herramientas de análisis causa raíz

2.3.1 Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa es una herramienta gráfica utilizada para identificar y clasificar las posibles causas que generan un problema o falla, facilitando el análisis sistemático de relaciones causa-efecto. (Ishikawa, 1985).

Las causas se agrupan habitualmente en categorías como métodos, máquinas, mano de obra, materiales, medio ambiente y medición, lo que favorece el análisis colectivo y estructurado. (Montgomery, 2013).

2.3.2 Método 5 porque

El método de los cinco porqués es una técnica de análisis cualitativa que consiste en formular de manera repetitiva la pregunta "¿por qué?" con el objetivo de profundizar progresivamente hasta identificar la causa raíz de un problema. (Ohno, 1988).

Esta herramienta es ampliamente utilizada en mantenimiento y gestión de calidad debido a su simplicidad, aunque su correcta aplicación requiere conocimiento del proceso y apoyo en datos objetivos. (Liker, 2004).

2.4 Equipos de cubierta

2.4.1 Escotillas

Las escotillas son aberturas practicadas en la cubierta o estructura del buque, diseñadas para permitir el acceso, ventilación o manipulación de carga, y que pueden ser cerradas mediante tapas móviles o sistemas mecánicos. (Rawson & Tupper, 2001).

Los mecanismos de apertura y cierre de escotillas incorporan elementos móviles sometidos a fricción, tales como bisagras, rodillos y bujes, los cuales deben garantizar estanqueidad, seguridad operacional y facilidad de mantenimiento durante la vida útil del buque.
(ISO 19901-6, 2019).

2.4.2 Pescantes

Los pescantes son estructuras mecánicas articuladas o fijas, instaladas en la cubierta de un buque, destinadas a izar, arriar o sostener embarcaciones menores, equipos o cargas, mediante el uso de cables, poleas y mecanismos de giro.
(Rawson & Tupper, 2001).

Estos equipos operan bajo altas solicitaciones mecánicas y exposición permanente al ambiente marino, lo que hace fundamental la correcta selección de materiales en componentes como bujes y ejes, a fin de reducir el desgaste y facilitar el mantenimiento.
(ABS, 2020).

2.4.3 Poleas

Las poleas son elementos mecánicos rotativos, generalmente provistos de una garganta, diseñados para guiar cables, cuerdas o cadenas, permitiendo cambiar la dirección de una fuerza y transmitir movimiento o carga dentro de un sistema mecánico.
(Shigley, Mischke & Budynas, 2015).

En aplicaciones navales, las poleas están sometidas a cargas cíclicas, ambientes corrosivos y condiciones de desgaste por fricción, por lo que el diseño de sus bujes y superficies de contacto es crítico para asegurar un funcionamiento seguro y confiable.
(Hutchings & Shipway, 2017).

2.5 Bujes

Un buje es un elemento mecánico diseñado para soportar cargas y permitir el movimiento relativo entre un eje y su alojamiento, reduciendo la fricción y el desgaste en sistemas rotativos o articulados.
(Shigley, Mischke & Budynas, 2015).

El desempeño del buje depende directamente del material de fabricación, las condiciones de carga, velocidad y lubricación, factores que influyen en la vida útil del conjunto.

(Budynas & Nisbett, 2019).

2.6 Polímero

Un polímero se define como un material constituido por macromoléculas formadas por la repetición de unidades estructurales más pequeñas, denominadas monómeros, unidas entre sí mediante enlaces químicos. Estas macromoléculas pueden presentar estructuras lineales, ramificadas o reticuladas, lo que determina en gran medida sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. (Callister & Rethwisch, 2018).

Desde el punto de vista de la ingeniería, los polímeros son ampliamente utilizados debido a su baja densidad, resistencia a la corrosión, capacidad de amortiguamiento, bajo coeficiente de fricción y buena resistencia al desgaste, características que los hacen especialmente adecuados para aplicaciones como bujes, cojinetes y elementos sometidos a fricción, en reemplazo de materiales metálicos tradicionales. (Budynas & Nisbett, 2019).

2.7 Costo del ciclo de vida (life cycle cost LCC)

El Costo del Ciclo de Vida (Life Cycle Cost, LCC) se define como el conjunto de costos asociados a un sistema, equipo o componente a lo largo de todas las etapas de su vida útil, desde su adquisición inicial hasta su retiro o disposición final. Este enfoque considera no solo el costo de compra, sino también los costos derivados de la instalación, operación, mantenimiento, fallas y reemplazo, permitiendo una evaluación económica integral de las alternativas de diseño (Blanchard & Fabrycky, 2011).

Desde el ámbito de la ingeniería y el mantenimiento industrial, el análisis LCC constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones, ya que permite comparar distintas soluciones técnicas en función de su desempeño económico a largo plazo. Al incorporar variables como confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, el LCC facilita la selección de componentes y materiales que minimicen el costo total de operación del sistema, incluso cuando su costo inicial sea superior, resultando especialmente relevante en equipos sometidos a operación continua o ambientes exigentes (Dhillon, 2014).

CAPÍTULO III:
DISEÑO Y SOLUCIÓN

3.1 Diagrama de Ishikawa

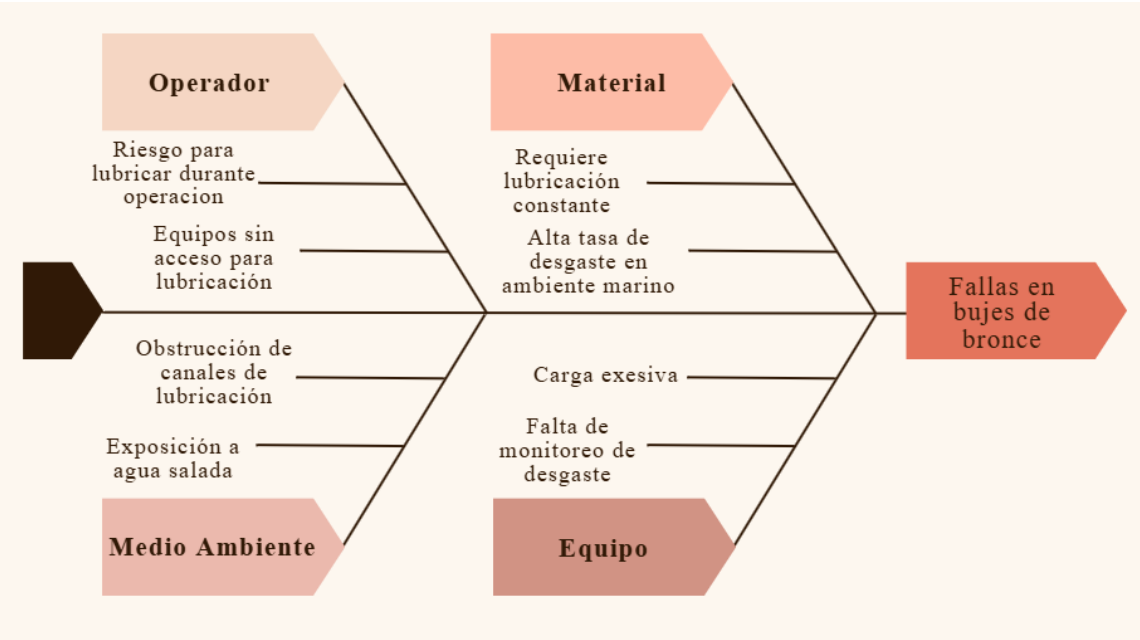


Figura 3.1-1Diagrama de Ishikawa.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Método de los 5 porque

- ¿Porque fallan los bujes de bronce?

Porque no reciben suficiente lubricación durante la operación

- ¿Porque no reciben suficiente lubricación?

Porque no hay acceso adecuado para suministrar lubricación durante la operación.

- ¿Porque no hay acceso adecuado para suministrar lubricación durante la operación?

Porque no es seguro llegar a la ubicación del equipo.

- ¿Porque no es seguro llegar a la ubicación del equipo?

Porque está en altura o es inseguro, ya que el equipo está en funcionamiento.

- ¿Por qué está en altura o es inseguro acceder al buje durante la operación?

Porque el buje fue instalado en una posición de difícil acceso sin planificar mantenimiento seguro, lo que hace que la operación de lubricación sea riesgosa.

3.3 **Comparación técnica Bronce v/s Thordon / Vesconite**

3.3.1 **Bronce CDA 905**

es una aleación de cobre con un contenido elevado de estaño, diseñada para aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica, buena capacidad de carga y excelente comportamiento al desgaste. Su composición típica, con aproximadamente un 10–12 % de estaño, le confiere una estructura metalúrgica estable y resistente, capaz de trabajar de manera confiable bajo condiciones de fricción por deslizamiento, cargas variables e impactos moderados.

Este material presenta una muy buena resistencia a la corrosión, incluso en contacto continuo con agua salada y atmósferas húmedas, lo que lo hace especialmente adecuado para equipos navales de cubierta.

En conjunto, el CDA 905 es un material ampliamente utilizado en la industria naval para la fabricación de bujes y camisas, donde se requiere un material robusto, resistente al ambiente marino y capaz de operar de forma segura en condiciones exigentes de trabajo continuo.

Cu% ¹	Pb%	Sn%	Zn%	Fe%	P% ²	Ni% ³	Al%	S%	Sb%	Si%
86.00–89.00	0.30	9.00–11.00	1.00–3.00	0.20	0.05	1.00	0.005	0.05	0.20	0.005

Figura 3.3-1 Composición química bronce CDA 905.

Fuente: Conex Casting.

Propiedades mecánicas :

Resistencia a la tracción, min		Resistencia a la fluencia, al 0,5% de extensión bajo carga, mín.		Alargamiento, en 2 pulg. O 50 mm min	Dureza Brinell (carga de 500 kg)	Observaciones
ksi	MPa	ksi	MPa	%	típica BHN	
44	303	25	172	10		
Propiedades mecánicas según ASTM B505/B505M-18						

Figura 3.3-2 Propiedades mecánicas bronce CDA 905.

Fuente: Conex Casting.

Propiedades físicas :

	US Customary	Métrica
Punto de fusión – Liquidus	1830 °F	999 °C
Punto de fusión – Solidus	1570 °F	854 °C
Densidad	0.315 lb/in ³ at 68 °F	8.72 gm/cm ³ at 20 °C
Gravedad específica	8.72	8.72
Conductividad eléctrica	11% IACS at 68 °F	0.064 MegaSiemens/cm at 20 °C
Conductividad térmica	43.2 Btu/sq ft/ft hr/°F at 68 °F	74.8 W/m at 20 °C
Coefficiente de expansión termal 68-572	11 • 10 ⁻⁶ per °F (68-572 °F)	19.8 • 10 ⁻⁶ per °C (20-300 °C)
Capacidad calorífica específica	0.09 Btu/lb/°F at 68 °F	377.1 J/kg at 293 °C
Módulo de elasticidad en tensión	15000 ksi	103400 MPa
Permeabilidad magnética*	1	1
Propiedades físicas proporcionadas por CDA		

Figura 3.3-3 Propiedades físicas bronce CDA 905.

Fuente: Conex Casting.

3.3.2 Vesconite

El Vesconite es un material polimérico de ingeniería desarrollado para aplicaciones de deslizamiento y carga, especialmente en entornos donde la lubricación es limitada o inexistente. Se trata de un termoplástico avanzado con una estructura interna homogénea y estable, diseñado para ofrecer bajo coeficiente de fricción, alta resistencia al desgaste y excelente estabilidad dimensional, incluso bajo condiciones severas de operación.

Una de las principales características del Vesconite es su capacidad de operar en seco o con lubricación marginal, lo que lo hace particularmente adecuado para aplicaciones navales expuestas al agua, donde los lubricantes convencionales pueden perderse o contaminarse. El material presenta una muy buena resistencia a la corrosión, ya que no se oxida ni se ve afectado por el agua salada, y muestra además una baja absorción de humedad, lo que le permite mantener sus tolerancias y desempeño a lo largo del tiempo.

Desde el punto de vista mecánico, el Vesconite combina una alta capacidad de carga con buena elasticidad, lo que le permite absorber vibraciones, impactos y pequeñas desalineaciones sin generar daños en el eje. Su comportamiento tribológico reduce significativamente el desgaste del componente contraparte, ofreciendo una vida útil prolongada del sistema eje-buje y menores necesidades de mantenimiento.

<i>Physical properties may be altered to some extent by processing conditions.</i>	
Density / Specific gravity	1.38 g.ml ⁻¹
Melting point	260°C
Hardness (Shore D)	84
Tensile strength at yield (D638)	65 MPa
Tensile strength at break	62 MPa
Elongation at break	26%
Tangent modulus of elasticity (D790)	3400 MPa
Flexural yield strength	120 MPa
Deflection temperature at 1.85 MPa/268 psi	93°C
Modulus of elasticity under compression	2290 MPa
Compression strength at yield	92 MPa
Shear strength	49 MPa
Notched impact strength charpy (D256)	33 J.m ⁻¹
Notched impact strength IZOD	16 J.m ⁻¹
Thermal conductivity	0.3 W.K ⁻¹ .m ⁻¹
Coefficient of linear thermal expansion	6x10 ⁻⁵ mm.mm ⁻¹
Maximum moisture absorption in water at 20°C/68°F	0.5%
Equilibrium moisture absorption in air (50% relative humidity, 23°C/73°F)	0.2%
Dynamic unlubricated friction coefficient on steel	0.12 - 0.20
Dielectric strength	14 kV.mm ⁻¹
Gamma ray resistance 50% loss of properties	100 Mrads

Figura 3.3-4 Propiedades físicas Vesconite.

Fuente: Vesconite marine desing manual.

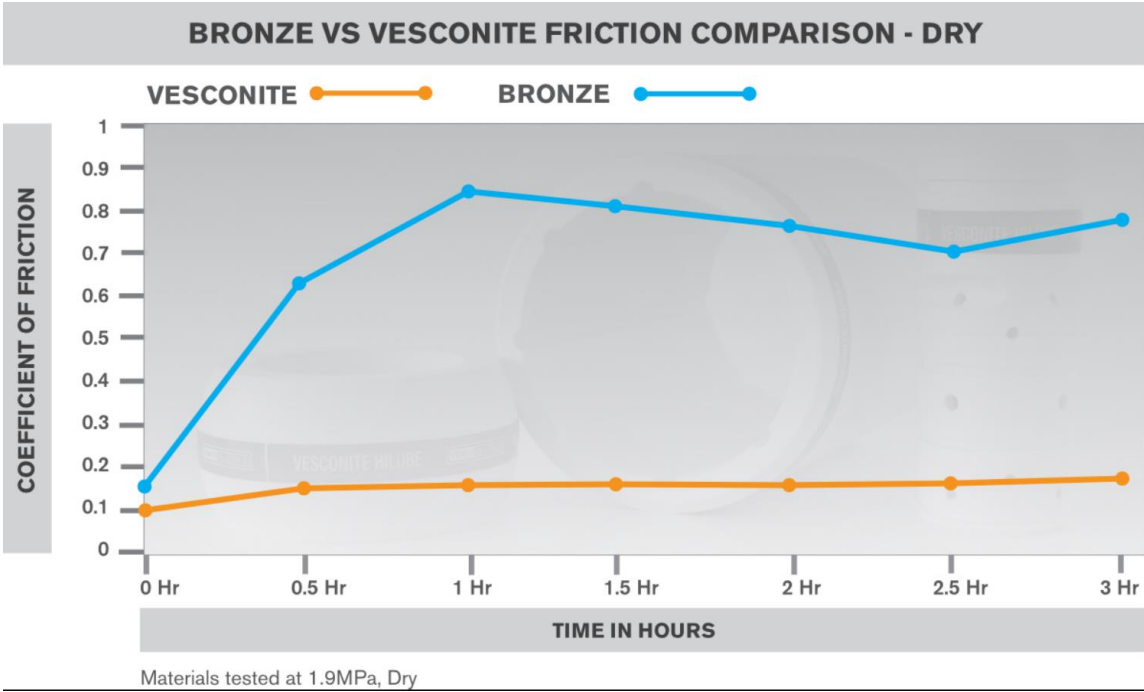


Figura 3.3-5 Test de fricción sin grasa.

Fuente: Vesconite.

Vesconite has good resistance to the following solutions at ambient temperatures		
5% Acetic acid	Ethylene dichloride	30% Phosphoric acid
10% Acetic acid	Freon II	85% conc Phosphoric acid
Acetone	5% Formic acid	10% Potassium chloride
Aniline	Gasoline	10% Potassium dichromate
Benzine	Glycerol (Glycerine)	1% Potassium hydroxide
Bleaching lye	Glycol	10% Potassium permanganate
Brake fluid	Grease	Silicone fluids
Butane	Heptane	1% Soap solutions
Butyl acetate	Hexane	10% Sodium bicarbonate
10% Calcium chloride	10% Hydrochloric acid	10% Sodium bisulphite
Calcium hypochlorite	5% Hydrofluoric acid	20% Sodium carbonate
Carbon disulphide	30% Hydrogen peroxide	10% Sodium chloride
Carbon tetrachloride	Kerosene	1% Sodium hydroxide
40% Chromic acid	Methanol	10% Sodium hypochlorite
10% Citric acid	Methyl ethyl ketone	30% Sulphuric acid
Cottonseed oil	Mineral oils	Toluene
25% Detergents	Motor oils	Transformer oil
Dibutyl phthalate	10% Nitric acid	Turpentine
Diesel oil	100% Oleic acid	Vaseline
Dioxane	Olive oil	Vegetable oils
Ethanol	Paraffin	Water
Ether (diethyl-)	Perchloroethylene	White spirit
Ethyl acetate	Petrol	Xylene

Figura 3.3-6 Resistencia química Vesconite.

Fuente: Vesconite marine desing manual.

3.3.3 **Thordon**

ThorPlas es un material polimérico de ingeniería desarrollado por Thordon Bearings, diseñado para aplicaciones de bujes y cojinetes sometidos a altas cargas y bajas velocidades, particularmente en entornos marinos e industriales severos. Se trata de un termoplástico de alto desempeño, reforzado internamente para proporcionar una elevada resistencia mecánica, excelente estabilidad dimensional y muy buen comportamiento tribológico, incluso bajo condiciones de lubricación limitada o intermitente.

Una de las principales características del ThorPlas es su alta capacidad de carga, comparable y en muchos casos superior a la de los broncees tradicionales, lo que lo convierte en una alternativa eficaz para reemplazar bujes metálicos en equipos de cubierta. El material presenta un bajo coeficiente de fricción, lo que reduce el par de arranque y el calentamiento durante la operación, al mismo tiempo que minimiza el desgaste del eje con el que trabaja.

Desde el punto de vista ambiental y operativo, ThorPlas es totalmente resistente a la corrosión, no se oxida ni se degrada en presencia de agua salada, humedad o contaminantes comunes en el ambiente marino. Puede operar en seco, con lubricación por agua o con lubricación marginal, lo que reduce significativamente la dependencia de grasas y aceites y, en consecuencia, los costos de mantenimiento y el impacto ambiental.

THORPLAS TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES - METRIC & IMPERIAL

Property		Unit of Measure	Value
Specific Gravity		–	1.40
Hardness (ASTM D2240)		Shore-D	83
Ultimate Tensile Strength (ASTM D638)		MPa (psi)	66 (9,600)
Elongation at Break		%	~10
Tensile Modulus of Elasticity (ASTM D638)		MPa (psi)	2,930 (425,000)
Compressive Strength (ASTM D695)		MPa (psi)	>400 (58,000)
Compressive Stress at Yield (2% offset) (ASTM D695)		MPa (psi)	91 (13,200)
Compressive Young's Modulus of Elasticity (ASTM D695)		MPa (psi)	3,280 (476,000)
Notched Impact Resistance (ASTM D256)		J/m (ft.lb/in.)	40 (0.75)
Coefficient of Friction			
Dry (ASTM D3702) 0.27MPa or 40psi		–	0.15-0.30
Dry (>200 bar or >3000psi)		–	~0.1
Wet (>200 bar or >3000psi)		–	0.10-0.17
Abrasive Wear (Rotary Drum Dry Abrasion) (ASTM D5963)		mm ³ (in. ³)	~200 (0.012)
Thermal Conductivity		W/m-k (Btu/hr-ft.F)	~0.25 (~0.14)
Coefficient of Thermal Expansion (ASTM D696 modified)		cm/cm/°C (-20°C to 100°C)	4.6x10 ⁻⁵ (2.6x10 ⁻⁵)
		(in/in/°F) (-4°F to 212°F)	
Absorption % in Water (22°C) (ASTM D570)	24-hr	Vol %	< 0.05
	Long-term	Vol %	< 0.15
Melting Temperature		°C (°F)	> 250 (> 480)
Operating Temperatures – Min. / Max.	Dry	°C (°F)	-50/110 (-58/230)
	Wet	°C (°F)	-10/80 (14/176)
Note: Properties are typical values, unless otherwise noted, and may be altered to some extent by processing conditions.			

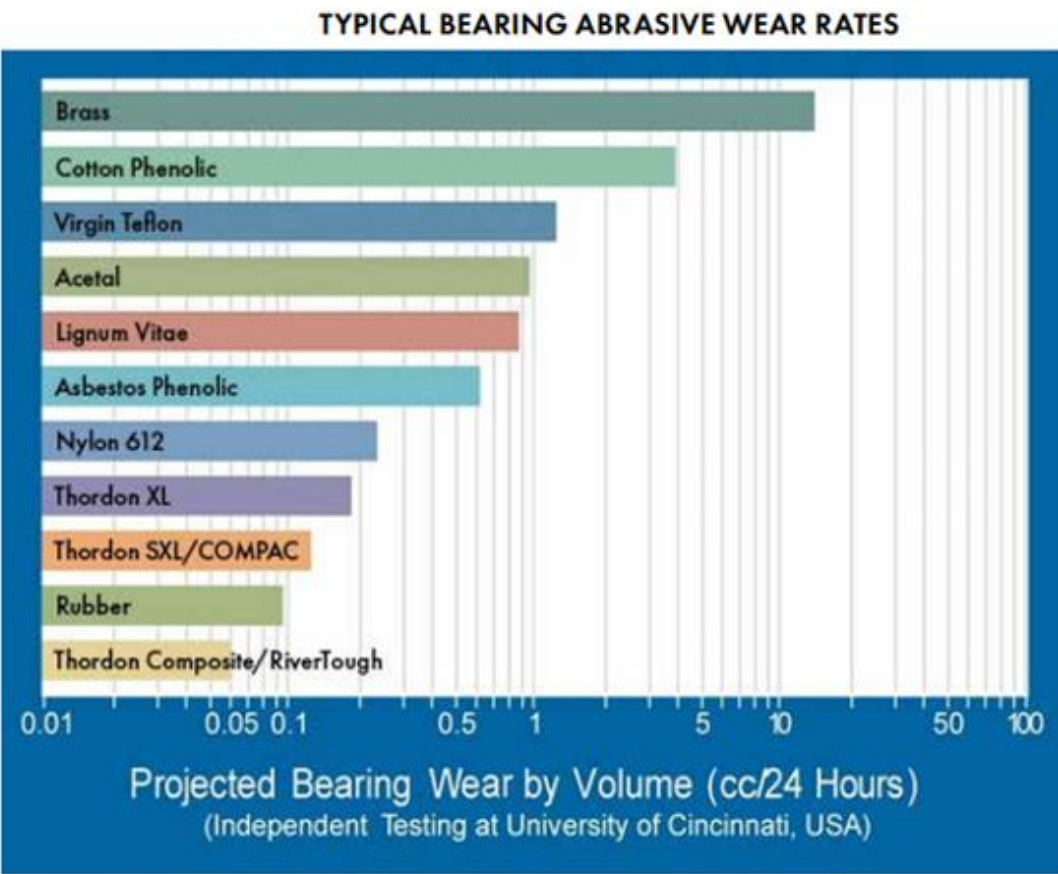
Figura 3.3-7 Propiedades físicas Thorplas.

Fuente: Thorplas engineering manual.

THORDON CHEMICAL RESISTANCE CHART					
Chemical/Fluid	ThorPlas®	Thordon Elastomers	Chemical/Fluid	ThorPlas®	Thordon Elastomers
Salt solutions (Aq.)	A	A	Hydrocarbon/fuels	A	A-D
Ammonium chloride	A	A	Aromatic hydrocarbons	A	D
Calcium chloride	A	A-B	Benzene	A	D
Cupric chloride	A	A	Toluene	A	D
Magnesium chloride	A	A	Xylene	A	D
Potassium chloride	A	A	Aliphatic – gasoline, grease	A	A-B
Sodium chloride	A	A-B	Lubricating oils (petroleum)	A	B
Weak acids (Aq.)	A-B	B-D	Liquid propane gas	A	B-C
Acetic acid	B	D	Chlorinated Solvents	C-D	D
Benzoic acid	A	D	Ethylene Chloride	C	D
Boric acid	A	A-B	Chloroform	C	D
Carbonic acid	A	A	Alcohols	A	D
Chromic acid	A	D	Ethanol	A	D
Citric acid	A	A	Methanol	A	D
Formic acid, 5%	A	D	Isopropyl alcohol	A	D
Lactic acid	A	B-D	Ketones	A-B	D
Strong acids	A-C	B-D	Methyl ethyl ketone	A	D
Hydrochloric, 10%	C	B	Acetone	B	D
Nitric acid, 0.1%	A	C	Ethers	A	D
Phosphoric acid, 3%	A	A	Diethyl ether	A	D
Sulphuric, 5%	A	B-C	Isopropyl ether	A	B
Sulphuric, concentrated	C	D	Esters	A	D
Weak bases	A-B	A-C	Ethyl acetate	A	D
Ammonia 10% Aq.	A	A	Methyl acetate	A	D
Magnesium hydroxide, 10%	B	C	Freon 12	A	A-C
Potassium carbonate	A	B	Detergents, Organic	A	B-D
Sodium carbonate	A	B	Castor oil	A	A-B
Triethanolamine	B	B-D	Silicone fluids	A	A
Strong bases	C-D	B	Vegetable Oils	A	A-B
Potassium hydroxide, 10%	C	B			
Sodium hydroxide, 10%	C	B			
Oxidizing agents	A	B-C			
Hydrogen peroxide, 1-3%	A	B			
Chromic acid	A	C			
A: Excellent-No Affect; B: Good-Little Affect; C: Fair-Moderate Affect; D: Unacceptable					

Figura 3.3-8 Propiedades químicas Thorplas.

Fuente: Thorplas engineering manual.



NOTE: Wet third particle abrasion.
Shaft Material: carbon steel
Bearing I.D.: 2.5 cm (1 in.)
Abrasive slurry mixture: 2% bentonite, 6% sand, 6% clay, 86% water

Figura 3.3-9 Comparación de desgaste.
Fuente: Thordon engineering manual.

3.4 Ingeniería de diseño para la fabricación de los bujes

En este apartado se desarrollan los criterios de diseño necesarios para definir las dimensiones finales de los bujes fabricados en bronce CDA 905, Thordon y Vesconite. Se determinan las interferencias entre el buje y su calzo, así como las tolerancias dimensionales requeridas para el correcto montaje. Asimismo, se realizan los cálculos de claro funcional entre el buje y el eje, considerando las condiciones de operación tales como temperatura, carga aplicada y comportamiento del material. El análisis permite garantizar un funcionamiento adecuado, evitando fallas por agarrotamiento, desgaste prematuro o deformaciones durante el servicio.

3.4.1 Bronce CDA 905

Para la instalación y diseño de bujes de bronce se utiliza la tabla de interferencias para ajustes de apriete así también se deja un claro respecto al eje con una tolerancia A11 / h11 que es un ajuste holgado para equipos de cubierta.

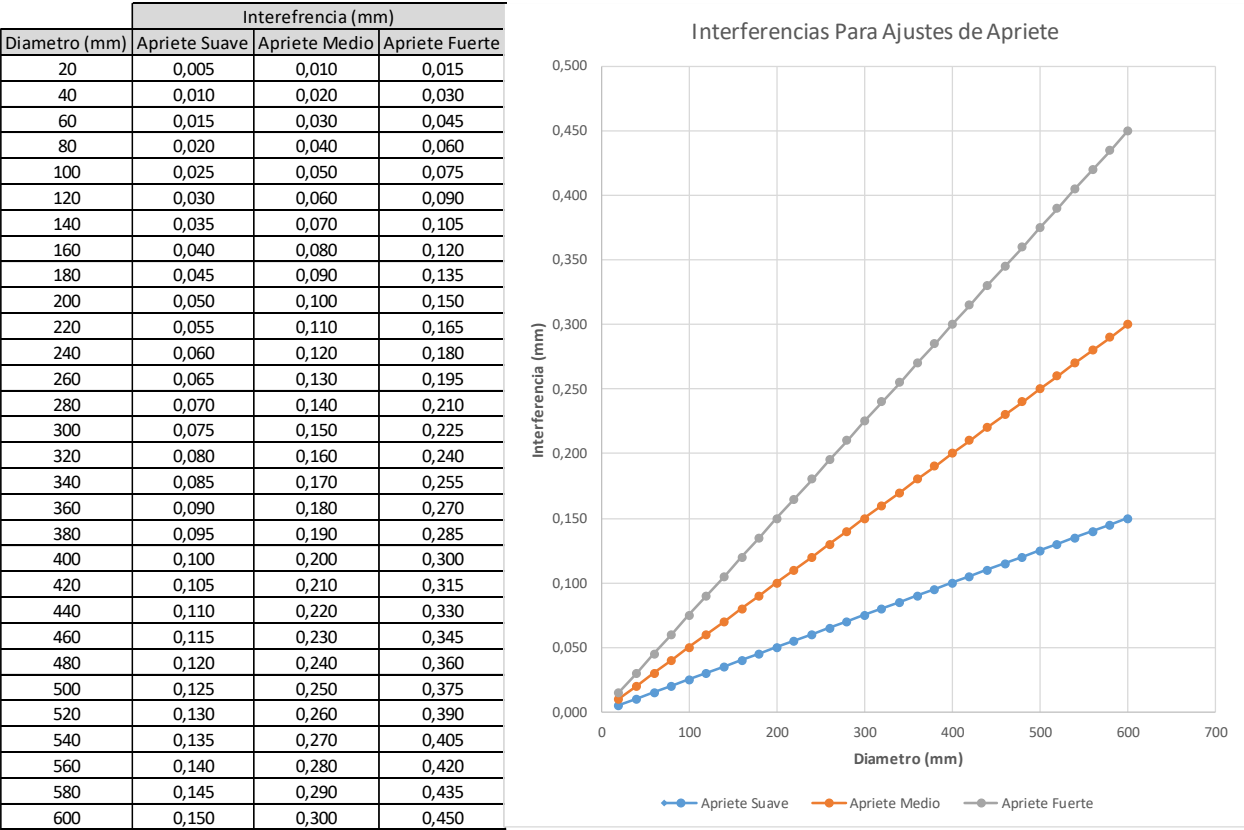


Tabla 3.4-1 Interferencias para ajustes de apriete.

Fuente: ASMAR.

3.4.2 Vesconite

Para el diseño de los bujes de vesconite se utiliza la calculadora que nos proporciona la marca en su propia página web, basta poner los datos y nos da como resultado los cálculos de mecanizado para el buje.

INPUT YOUR DATA

Housing diameter	100	mm
Shaft diameter	80	mm
Bearing Length	150	mm
Press fit?	☒ Yes ☐ No	
Maximum operating temp	40	°C
Minimum operating temp	-5	°C
Total mass supported	500	kg
Number of bearings supporting total mass	1	
Rotation	1	RPM

Figura 3.4-1 Diseño de buje.

Fuente: Vesconite.

YOUR RESULTS

Outside diameter	100.28 mm
Inside diameter	80.60 mm
Wall thickness	9.84 mm
Loading pressure P	0.41 MPa
Shaft surface speed V	0.25 m/min
PV	0.10 MPa.m/min No lubrication required, but initial lubrication will increase bearing life.
Expansion gap	0.00 mm
Interference fit	0.28 mm
Bore closure	0.35 mm
Additional clearance	0.00 mm
Assembled clearance	0.25 mm
Fitted inside diameter	80.25 mm
Press fit force	0.90 tons
Outside diameter after cooling with dry ice	99.89 mm

Figura 3.4-2 Diseño de buje.

Fuente: Vesconite.

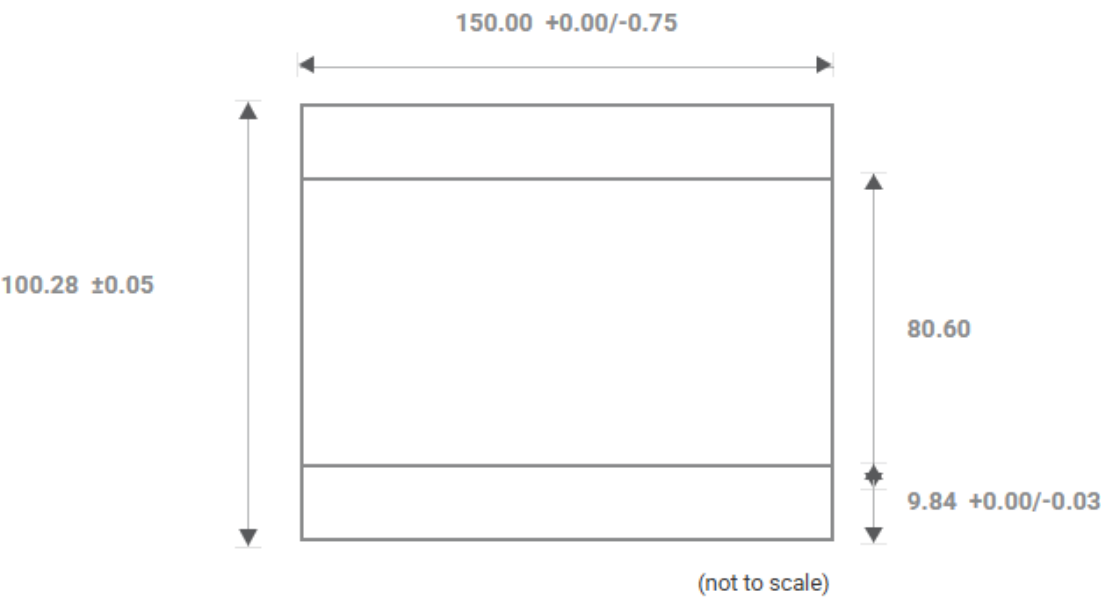


Figura 3.4-3 Diseño de buje.
Fuente: Vesconite.

Size adjustment for various machining temperatures

Bearing temp	OD mm	Wall thickness
5-10 °C	100.16	9.83
10-15 °C	100.19	9.83
15-20 °C	100.22	9.84
Bearing temp	OD mm	Wall thickness
20-30 °C	100.28	9.84
30-35 °C	100.33	9.85
35-40 °C	100.36	9.85

Figura 3.4-4 Diseño de buje.
Fuente: Vesconite

3.4.3 Thordon

Para thordon se utiliza la aplicación thordon bearing sizing calculation que se le proporciona al cliente con la compra de un producto de la marca.

Input Data

Dimension Scale:	Metric (mm)
Temperature Scale:	Celsius
Maximum Operating Temperature:	45 °C
Minimum Operating Temperature:	-2 °C
Machine Shop Ambient Temperature:	21 °C
Maximum Shaft Diameter:	70.00 mm
Maximum Housing Diameter:	95.00 mm
Minimum Housing Diameter:	95.00 mm
Housing Length:	110.00 mm
Type of Lubrication:	Water
Grade of Thordon Used:	ThorPlas-Blue
Type of Service:	Ind. Oscillating Rotation
Type of Installation:	Interference Freeze Fit
Load on Bearing:	500 kg
Shaft RPM:	1

Figura 3.4-5 Diseño de buje.

Fuente: Thordon bearing sizing calculation

Data Sheet

-- ATTENTION --

Method of axial retention must be considered.

	Designed at 21 °C	Machined at 21 °C	
Machined Bearing Outside Diameter:	95.37	95.37 mm	+0.05, -0.05
Machined Bearing Inside Diameter:	70.56	70.56 mm	(For reference only)
Calculated Machined Bearing Length:	109.71	109.71 mm	+0.00, -0.25
Bearing Wall Thickness:	12.41	12.41 mm	+0.00, -0.05
Amount of Interference:	0.37 mm		
Bore Closure Factor:	1.100		
Bore Closure Amount:	0.41 mm		
Minimum Installed Diametrical Clearance (MIC):	0.15 mm		
Diametric Running Clearance:	0.07 mm		
Diametric Thermal Expansion:	0.03 mm		
Diametric Absorption Allowance:	0.05 mm		
Axial Thermal Expansion:	0.12 mm		
Axial Absorption Allowance:	0.16 mm		
Pressure on Bearing:	0.637 MPa		
Peripheral Velocity:	0.00 m/sec		
Outside Diameter after dry ice cooling:	95.04 mm		
Note: Forced press required after dry ice cooling; Never immerse a ThorPlas-Blue bearing in liquid nitrogen			

Figura 3.4-6 Diseño de buje.

Fuente: Thordon bearing sizing calculation

3.5 Métodos de instalación de bujes

En la industria naval, la instalación de bujes se realiza generalmente mediante ajustes con interferencia, con el objetivo de garantizar una fijación segura, rígida y duradera entre el buje y su alojamiento o calzo. Este tipo de ajuste consiste en que el diámetro exterior del buje es ligeramente mayor que el diámetro interior del alojamiento, lo que impide su montaje en condiciones normales sin la aplicación de un método auxiliar.

Para permitir la inserción del buje, se emplean métodos de contracción, siendo el más común el enfriamiento del buje, que provoca una reducción temporal de sus dimensiones debido a la contracción térmica del material. Una vez reducido su diámetro, el buje puede ser introducido en el calzo con menor esfuerzo y sin generar daños en las superficies de contacto. Tras recuperar la temperatura ambiente, el buje se expande nuevamente, generando la interferencia necesaria para lograr un ajuste firme.

Este procedimiento es ampliamente utilizado en componentes navales críticos, como bujes de bocinas, ejes de propulsión y sistemas de gobierno, elementos de cubierta, donde se requiere una alta capacidad de transmisión de cargas, resistencia al deslizamiento y estabilidad dimensional frente a esfuerzos mecánicos y vibraciones. El ajuste por interferencia asegura, además, una adecuada distribución de esfuerzos y minimiza el riesgo de holguras durante la operación del buque.

En conclusión, el montaje de bujes mediante interferencia y contracción térmica constituye una práctica estándar en la industria naval, debido a su confiabilidad, precisión y capacidad para garantizar la integridad estructural y funcional de los sistemas mecánicos del buque.

3.5.1 Bronce CDA 905

El procedimiento más utilizado consiste en sumergir el buje de bronce en un recipiente térmicamente aislado que contiene nitrógeno líquido, alcanzando temperaturas extremadamente bajas. Este enfriamiento provoca una contracción uniforme del buje, reduciendo temporalmente su diámetro exterior y permitiendo su inserción en el alojamiento sin la aplicación de fuerzas mecánicas excesivas. Una vez instalado y recuperada la temperatura ambiente, el buje se expande, generando la interferencia necesaria para asegurar una fijación firme y permanente.

Como alternativa al uso de nitrógeno líquido, en aplicaciones donde no se dispone de este recurso o se requiere un procedimiento menos extremo, se emplea también la técnica de enfriamiento mediante hielo seco (dióxido de carbono sólido). Si bien este método alcanza temperaturas menos bajas que el nitrógeno líquido, resulta suficiente para lograr la contracción requerida en determinados diámetros y tolerancias, siendo una solución práctica y segura en muchos entornos de mantenimiento y montaje naval.

Ambos métodos permiten un montaje preciso, reducen el riesgo de daño superficial del buje o del calzo y contribuyen a mantener las propiedades mecánicas del bronce, consolidando estas técnicas como prácticas habituales y aceptadas en la industria naval.

3.5.2 Vesconite

El método de montaje por contracción térmica representa la alternativa más simple y eficiente para la instalación de bujes Vesconite. Generalmente se emplea hielo seco como medio de enfriamiento, sin embargo, el uso de nitrógeno líquido constituye una opción válida cuando el hielo seco no está disponible.

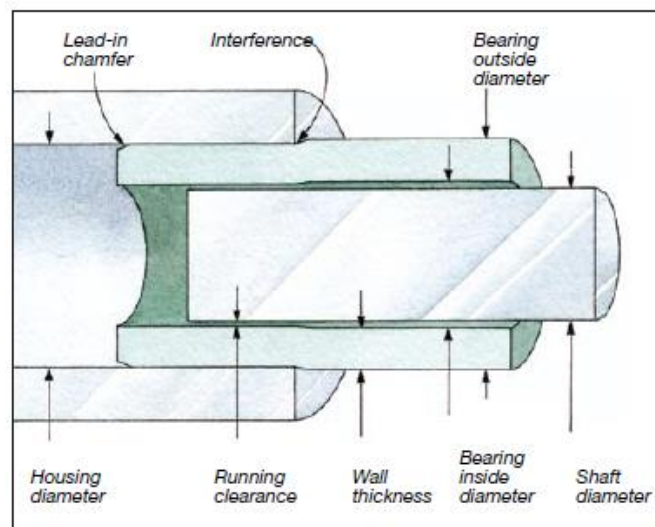


Figura 3.5-1 Instalación buje.

Fuente: Vesconite desing manual

3.5.2.1 Hielo seco

El material Vesconite posee un coeficiente de dilatación térmica relativamente elevado, del orden de 6×10^{-5} mm/mm/°C, lo que lo hace especialmente adecuado para montajes por contracción térmica. Al someter el buje a un proceso de enfriamiento mediante hielo seco durante un período de dos a tres horas, se logra

una disminución de temperatura comprendida entre 40 y 60 °C, generando una reducción dimensional significativa. En el caso de un buje de 500 mm de diámetro, esta disminución térmica puede provocar una contracción cercana a 1,2 mm, facilitando su instalación en el alojamiento con interferencia. Durante la aplicación de este método, especialmente en espacios cerrados, es imprescindible asegurar una ventilación suficiente para prevenir riesgos asociados a la disminución de oxígeno en el ambiente.

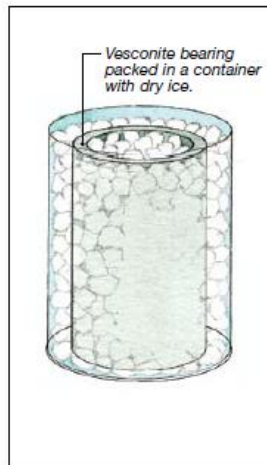


Figura 3.5-2 Buje sumergido en hielo seco.

Fuente: Vesconite marine desing manual

3.5.2.2 Nitrógeno Líquido

Para el proceso de enfriamiento por contracción térmica, se recomienda emplear un recipiente metálico de dimensiones adecuadas, provisto de aislamiento térmico. Dicho aislamiento puede lograrse mediante el uso de lana de vidrio, lana de roca o capas múltiples de cartón corrugado o material plástico amortiguante, fijados externamente con elementos simples como cinta o flejes. El buje debe colocarse sobre soportes no metálicos, tales como bloques de madera o ladrillos, de manera que quede elevado aproximadamente 150 mm respecto del fondo del recipiente, evitando el contacto directo con este. Asimismo, se coloca una tapa no hermética sobre el recipiente; cuando esta es de madera o tablero aglomerado con un espesor suficiente, contribuye adicionalmente a la aislamiento térmica. El nitrógeno líquido se introduce de forma gradual en el fondo del recipiente, hasta formar una capa poco profunda, siendo suficiente con cubrir únicamente la base. Este procedimiento permite un enfriamiento eficaz y controlado del buje sin necesidad de sumergirlo completamente.

Es importante asegurar que el nitrógeno líquido no entre en contacto directo con el buje.

Debe permitirse que el buje se enfríe durante aproximadamente 1 a 1½ horas, lo cual suele ser suficiente para lograr la contracción necesaria para un ajuste deslizante. Antes de retirar el buje del recipiente, se debe medir el diámetro exterior superior con un calibrador vernier para verificar que se haya alcanzado la contracción requerida.

El nitrógeno debe utilizarse únicamente en áreas bien ventiladas. Se debe tener especial cuidado durante su manipulación y cumplir con las normas generales de seguridad, ya que el nitrógeno líquido puede provocar quemaduras graves. Para precauciones más detalladas, se recomienda consultar al proveedor de nitrógeno líquido. Asimismo, se debe utilizar protección facial y vestimenta de seguridad adecuada.

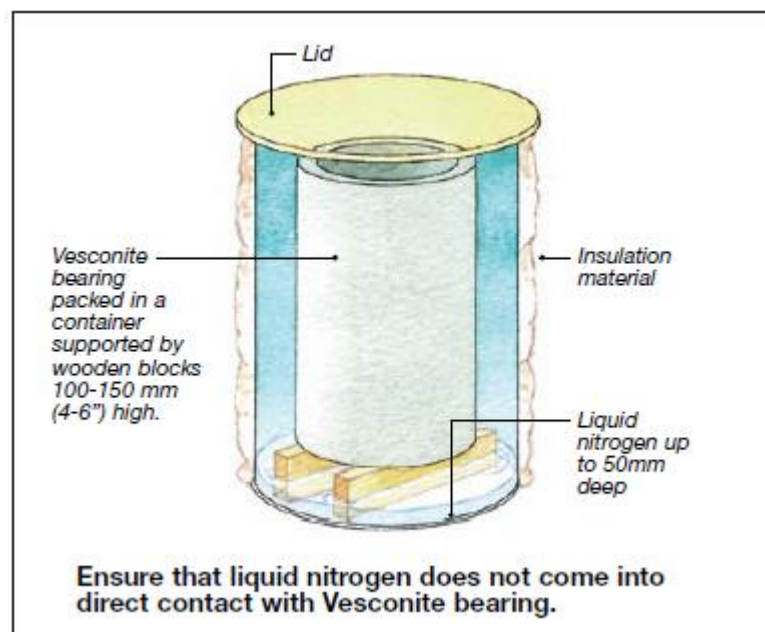


Figura 3.5-3 Buje enfriado por nitrógeno líquido.

Fuente: Vesconite marine desing manual.

3.5.3 Thordon

En aplicaciones donde los bujes ThorPlas operan a temperaturas superiores a 70 °C, resulta necesario complementar el montaje por interferencia con sistemas antirrotación mecánicos. Si bien el ajuste por interferencia suele ser suficiente en condiciones normales de operación, el aumento de temperatura puede inducir fenómenos de relajación de esfuerzos, reduciendo la capacidad del buje para mantenerse fijo dentro de su alojamiento. Con el fin de evitar la rotación del buje bajo estas condiciones térmicas, se recomienda la instalación de pasadores radiales, los cuales atraviesan la pared del alojamiento e ingresan en orificios practicados en el cuerpo del buje. Estos orificios deben ser pasantes, garantizando que el pasador no genere concentraciones de esfuerzo ni

deformaciones en el diámetro interior. La profundidad de inserción del pasador debe ser, como mínimo, equivalente a la mitad del espesor de la pared del buje, considerando además el desgaste esperado durante la vida útil para prevenir el contacto con el eje. Cuando se emplean dos pasadores, su disposición debe ser opuesta diametralmente, asegurando una distribución equilibrada de las cargas.

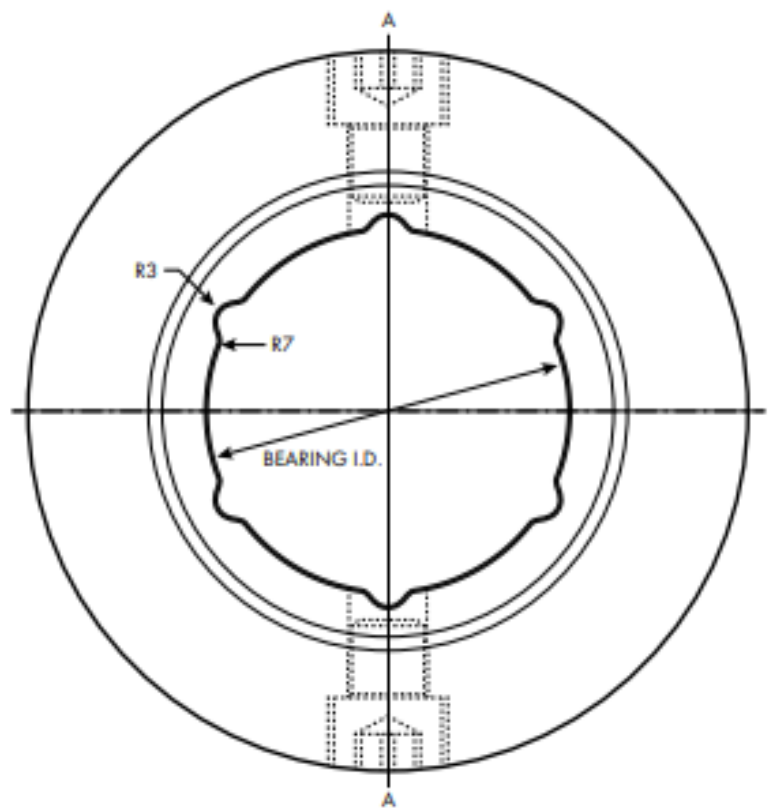


Figura 3.5-4 Pines anti rotatorios.

Fuente: Thorplas engineering manual.

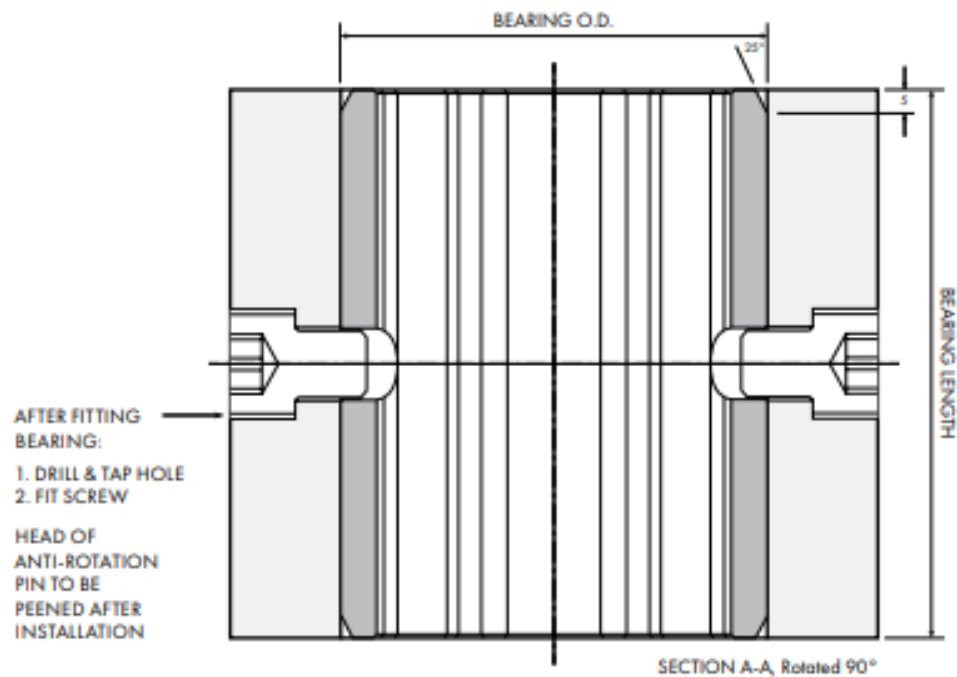


Figura 3.5-5 Pines anti rotatorios

Fuente: Thorplas engineering manual

3.5.3.1 Hielo Seco

La contracción térmica de los bujes puede obtenerse mediante su exposición directa al hielo seco, método que, combinado con un montaje por presión, resulta especialmente eficaz en aplicaciones con elevados valores de interferencia. Este procedimiento permite reducir las fuerzas de inserción necesarias y mejora el control durante el montaje. En términos operativos, el tiempo de enfriamiento requerido suele situarse entre una y dos horas, período suficiente para generar una disminución apreciable del diámetro exterior del buje. Antes de iniciar el prensado, es imprescindible verificar dimensionalmente el buje con el fin de confirmar que la contracción obtenida es adecuada para el ajuste previsto. Adicionalmente, la presencia de chaflanes de guía tanto en el alojamiento como en el buje contribuye a una correcta alineación y reduce el riesgo de daños durante la instalación.

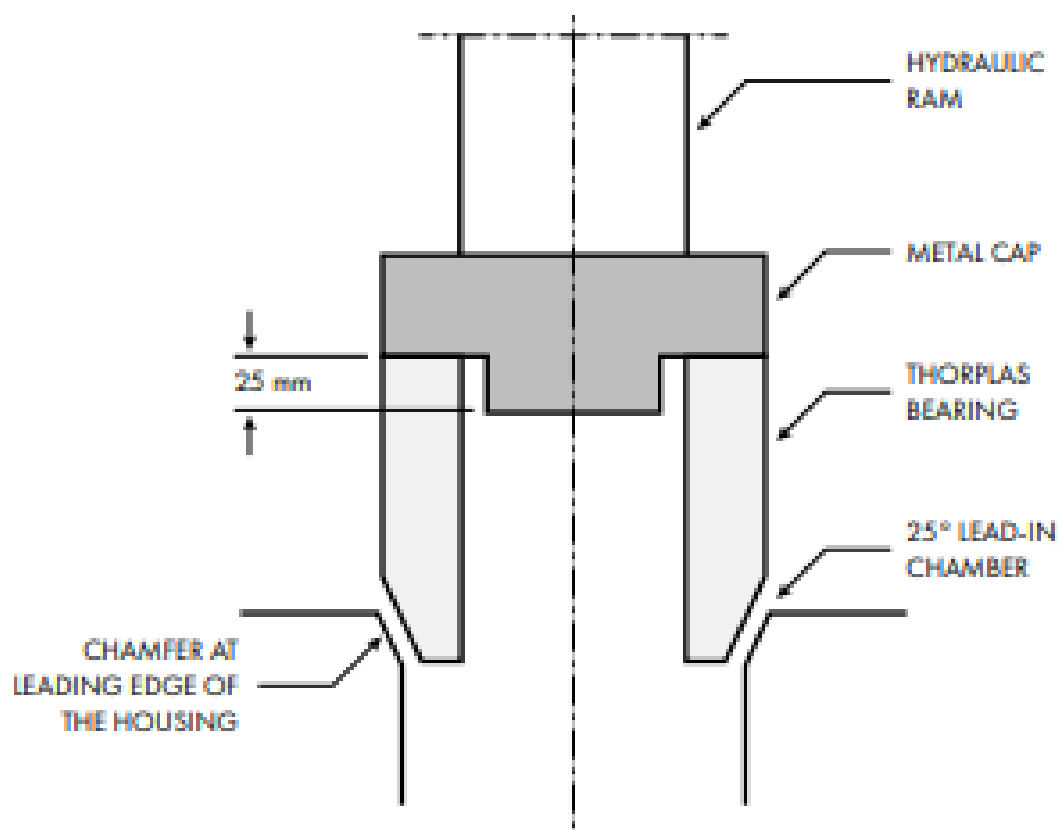


Figura 3.5-6 Instalación buje.

Fuente: Thorplas engineering manual

3.5.3.2 Nitrógeno Líquido

Si bien es posible emplear nitrógeno líquido como medio de enfriamiento, es fundamental evitar la inmersión directa de los bujes ThorPlas en el líquido criogénico, debido al riesgo de agrietamiento del material durante la fase de recuperación térmica. Como alternativa segura, el buje debe colocarse de manera suspendida dentro del recipiente, expuesto únicamente al vapor frío generado por el nitrógeno líquido, permitiendo un enfriamiento gradual y controlado. El tiempo de exposición recomendado en estas condiciones es del orden de 30 minutos, lo cual resulta suficiente para lograr la contracción dimensional necesaria sin comprometer la integridad estructural del buje.



Figura 3.5-7 Enfriamiento por nitrógeno líquido.

Fuente: Thorplas engineering manual

CAPÍTULO IV:
EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.1 **Análisis LCC**

Para realizar el análisis económico entre estos dos tipos de bujes utilizaremos el LCC para este caso calcularemos el Costo ciclo de vida con la siguiente formula:

$LCC = C_{mat} + C_{mon} + C_{mec} + C_{lub} + C_{man}$

Donde:

LCC: Costo ciclo de vida

C_{mat}: Costo inicial del material del buje

C_{mon}: Costo montaje

C_{mec}: Costo de Mecanizado

C_{lub}: Costo de lubricación

C_{man}: Costo de mantenimiento preventivo

4.1.1 **Costo inicial del material**

Consideremos 3 bujes de Ø exterior de 95mm Ø interior de 70mm y un largo de 100mm.

Procedemos a escoger el material a utilizar en este caso Thordon Thorplas

Bocina Thordon Thorplas Ø130x30x500mm	NR	\$893.000
---------------------------------------	----	-----------

Figura 4.1-1 Valor buje Thorplas.

Fuente: ASMAR.

Escogemos un material similar de la marca Vesconite

Bocina Vesconite XL Ø110x50x330mm	NR	\$629.300
-----------------------------------	----	-----------

Figura 4.1-2 Valor buje Vesconite.

Fuente: ASMAR.

Así también elegimos una barra de bronce con dimensiones similares que cumplan los requerimientos solicitados.

Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø4"	Kg	\$10.174
---	----	----------

Figura 4.1-3 Valor bronce CDA 905.

Fuente: ASMAR.

Este producto al venderse por kilo se necesita calcular el volumen con el largo que vamos a utilizar para así obtener el costo.

$\varnothing\ 4'' = 101,6\text{mm} = 10,16\text{cm}$

$R = 2'' = 50,8\text{mm} = 5,08\text{cm}$

Densidad del bronce CDA 905:

Densidad	0.315 lb/in ³ at 68 °F	8.72 gm/cm ³ at 20 °C
----------	-----------------------------------	----------------------------------

Figura 4.1-4 Densidad bronce CDA 905.

Fuente: Conex Casting

$\text{Volumen del cilindro de bronce} = \pi \times (5,08\text{cm})^2 \times 30\text{cm} = 2.432,2\text{cm}^3$

$\text{Peso} = 2.432,2\text{cm}^3 \times 8,72\text{g/cm}^3 = 21.208,8\text{g} = 21,2\text{kg}$

$\text{Costo material} = 21,2\text{kg} \times 10.174\$/\text{kg} = \$215.688,8$

4.1.2 Costo por montaje

4.1.2.1 Calibramiento de calzo

Antes de instalar el buje, es necesario preparar y verificar dimensionalmente el alojamiento donde se insertará. Esto implica el calibramiento del calzo (8HH), asegurando que el diámetro y la geometría cumplan con los requerimientos de interferencia. Este proceso incluye el uso de instrumentos de medición de precisión y ajustes mecánicos menores.

Costo: \$72.000

4.1.2.2 Dibujo técnico

El buje debe ser mecanizado siguiendo un dibujo técnico detallado (6HH) para garantizar un ajuste preciso con el calzo. El dibujo incluye todas las medidas y consideraciones que se proporcionan en las aplicaciones de cálculo en el caso de vesconite y thordon mientras que en el buje de bronce se realizan los cálculos según el punto 3.4.1.

Costo: \$54.000

4.1.2.3 Nitrógeno líquido / Hielo seco

Para permitir la inserción del buje en su alojamiento con interferencia, se utiliza nitrógeno líquido como medio de contracción térmica. El buje se suspende en el vapor frío del nitrógeno líquido durante un período controlado, lo que provoca una reducción temporal de su diámetro sin comprometer la integridad del material.

Valor m³ de nitrógeno líquido: \$2.033

El nitrógeno líquido se vende en 2 formatos:

110m³ Costo: \$223.630

55m³ Costo: \$111.815

Al ser nuestro buje de dimensiones pequeñas no se requiere tanto volumen de nitrógeno por lo que consideraremos un volumen de 55m³.

Costo kg hielo seco: \$2.340

El hielo seco es suministrado en los siguientes formatos

Suministrado en cajas desechables de poliestireno o en contenedores isotérmicos

	Medida (mm)	Contenido (kg)
Caja desechable 16 L	317 x 317 x 317	10
Arcón desechable 500 L	1820 x 770 x 770	450
Contenedor isotérmico 50 L	610 x 410 x 585	30
Contenedor isotérmico 150L	800 x 640 x 760	100
Contenedor isotérmico 250 L	980 x 900 x 775	200
Contenedor isotérmico 480 L	1200 x 1000 x 970	400
Contenedor isotérmico 600 L	1200 x 1200 x 970	500

Figura 4.1-5 Formatos venta hielo seco.

Fuente: Punto Insumo.

Teniendo en cuenta las dimensiones del contenedor y del buje, la caja de 16l es suficiente para contener el buje

Por lo que tendríamos un costo de \$23.400

4.1.2.4 Instalación del buje

La instalación requiere la intervención de dos mecánicos, cada uno trabajando aproximadamente (4HH) c/u, quienes se encargan de manipular el buje, colocar el calzo y asegurar la alineación correcta durante el montaje. Además, se requiere la presencia de un inspector, encargado de verificar las tolerancias, el ajuste y la correcta instalación, asegurando que el montaje cumpla con los estándares de calidad y seguridad. (4HH).

Costo: \$108.000

4.1.3 Costo por mecanizado del material

12HH confección buje polimérico ya que el material es más blando y ya viene con una perforación lo que hace que el proceso de mecanizado sea más rápido.

24hh confección buje de bronce el mecanizado de este material requiere más tiempo ya que se necesita quitar mucho material para hacer el diámetro interior además de confeccionar las canales de lubricación necesarias.

Valor HH \$9.000

Por lo tanto, el buje Thordon y Vesconite cuesta \$108.000

El Buje de bronce cuesta \$216.000

4.1.4 Costo de lubricación

Costo anual de lubricación para bujes de bronce (grasa + mano de obra): \$80.000

Costo anual de lubricación para bujes Thordon: N/a (Auto lubricante)

Costo anual de lubricación para bujes Vesconite: N/a (Auto lubricante)

4.1.5 Costo de mantenimiento preventivo

Cada entrada a dique (4años) es recomendable realizar una inspección visual, dimensional y hacer una limpieza en forma manual mecánica al buje, eje y canales de lubricación en el caso de los bujes de bronce para así conservar en la mejor condición el conjunto para que logre su vida útil esperada.

El costo de esta inspección tiene un costo aproximado de: 12HH c/u (\$108.000 c/u)

Bronce: por lo general estos bujes de bronce se suelen cambiar cada 2 entradas de dique (8 años) dependiendo la criticidad y el uso que se le dé al equipo.

Thordon / Vesconite: estos bujes están diseñados para durar toda la vida útil del buque (40 años) por lo que no requiere de cambio, sin embargo, es recomendable realizar una inspección visual y dimensional del buje para ver su desgaste.

Por lo que el buje de bronce se cambiaría 5 veces en toda su vida útil a cambio del buje polimérico que no es necesario su reemplazo.

4.1.6 Resultados LCC

4.1.6.1 Costo Inicial:

Bronce CDA 905: \$777.503

Vesconite: \$1.083.115

Thordon: \$1.346.815

4.1.6.2 Costo 5 años:

Bronce CDA 905: \$1.285.503
Vesconite: \$1.191.115
Thordon: \$1.454.815

4.1.6.3 Costo 10 años:

Bronce CDA 905: \$2.463.006
Vesconite: \$1.299.115
Thordon: \$1.562.815

4.1.6.4 Costo 20 años:

Bronce CDA 905: \$4.256.509
Vesconite: \$1.623.115
Thordon: \$1.886.815

4.1.6.5 Costo 30 años:

Bronce CDA 905: \$5.942.012
Vesconite: \$1.839.115
Thordon: \$2.102.815

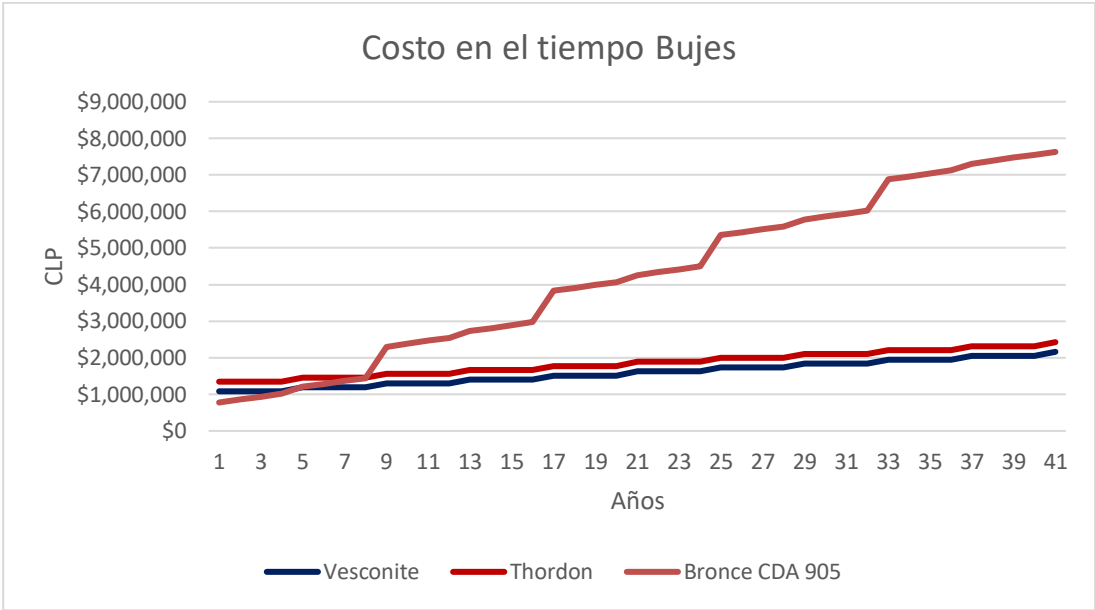


Figura 4.1-6 Costo de bujes en el tiempo.

Fuente: Elaboración Propia.

Material	Unidad de Medida	Precio unitario
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø3/4"	Kg	\$18.212
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø1"	Kg	\$8.333
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø1 1/2"	Kg	\$40.000
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø1 1/4"	Kg	\$8.295
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø1 3/4"	Kg	\$21.500
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø2"	Kg	\$10.425
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø2 1/2"	Kg	\$10.176
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø3"	Kg	\$10.176
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø3 1/2"	Kg	\$10.176
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø4"	Kg	\$10.174
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø4 1/2"	Kg	\$35.000
Barra redonda Bronce Aleación CDA 905 Ø6"	Kg	\$24.974
Bocina Vesconite XL Ø110x50x330mm	NR	\$629.300
Bocina Vesconite XL Ø140x60x330mm	NR	\$1.280.000
Bocina Thordon SXL Ø155x60x500mm	NR	\$1.251.000
Bocina Thordon SXL Ø140x70x330mm	NR	\$1.312.000
Bocina Thordon SXL Ø75x330mm	NR	\$528.000
Bocina Thordon SXL Ø170x70x330mm	NR	\$2.122.000
Bocina Thordon Thorplas Ø130x30x500mm	NR	\$893.000
Bocina Thordon XL Ø3 x 1 x 13"	NR	\$181.300
Bocina Thordon XL Ø4 1/2 x 3 x 13"	NR	\$184.444
Bocina Thordon XL Ø6 1/2 x 5 x 13"	NR	\$455.540
Bocina Thordon XL Ø7 1/2 x 4 1/2 x 13"	NR	\$961.000

Tabla 4.1-1 Costo de materiales.

Fuente: ASMAR.

CONCLUSION

A partir del análisis de los datos técnicos obtenidos y de la evaluación económica realizada, se concluye que el cambio de bujes de bronce por bujes poliméricos resulta técnica y económicamente viable. Los resultados demuestran que materiales poliméricos de ingeniería como Vesconite y ThorPlas de Thordon presentan un desempeño adecuado para las condiciones de operación analizadas, destacándose por su buena resistencia al desgaste, menor coeficiente de fricción y capacidad de operación con nula lubricación.

Desde el punto de vista económico, la sustitución de los bujes de bronce por bujes poliméricos permite una reducción de los costos asociados al mantenimiento, lubricación y reemplazo del buje por desgaste o falla, compensando e incluso superando la inversión inicial. Asimismo, la mayor vida útil proyectada y la disminución de fallas contribuyen a mejorar la confiabilidad del sistema.

En consecuencia, se establece que la implementación de bujes poliméricos como Vesconite o ThorPlas constituye una alternativa técnicamente confiable y económicamente favorable frente al uso tradicional de bujes de bronce, siendo recomendable su aplicación en sistemas con características operativas similares a las evaluadas en este estudio.

BIBLIOGRAFIA

- Kardec, A., & Nascif, J. (2002). *Manutenção: função estratégica*. Qualitymark Editora.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
- ISO 55000. (2014). *Asset management — Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization.
- Smith, D. J., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM—Gateway to world class maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering maintenance: A modern approach*. Gulf Professional Publishing.
- Dhillon, B. S. (2014). *Life cycle costing for engineers*. CRC Press.
- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System reliability theory: Models, statistical methods, and applications* (2nd ed.). Wiley.
- Ebeling, C. E. (2010). *An introduction to reliability and maintainability engineering* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- ISO 9000. (2015). *Quality management systems — Fundamentals and vocabulary*. International Organization for Standardization.
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. Prentice Hall.
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to statistical quality control* (7th ed.). Wiley.
- Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production*. Productivity Press.
- Liker, J. K. (2004). *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2019). *Shigley's mechanical engineering design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2015). *Diseño en ingeniería mecánica* (9.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2019). *Shigley's mechanical engineering design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (9th ed.). Wiley.
- ISO 19901-6. (2019). *Marine structures — Stationkeeping systems*. International Organization for Standardization.
- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic ship theory* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

- ABS. (2020). *Rules for building and classing marine vessels*. American Bureau of Shipping.
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems engineering and analysis* (5th ed.). Pearson Education.