

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
SEDE CONCEPCIÓN REY BALDUINO DE BELGICA**

**Sensorización de motores en cinta transportadora de Portuaria Cabo Froward**

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

Nombre del alumno

Daniel Sebastián Cisterna Bustos

Nombre profesor guía.

Ing. Juan José Figueroa Cohn

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: Sensorización de motores en cinta transportadora de Portuaria Cabo Froward

Nombre del candidato(a): Daniel Sebastián Cisterna Bustos

Carrera / Grado: Ingeniería en mantenimiento industrial con licenciatura en ingenierías

Campus: Concepción; Departamento: Mecánica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Juan José 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: 13/01/2026

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13/01/2026

; 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**

Portuaria Cabo Froward es una empresa que se dedica a la carga y descarga de graneles de diferentes tipos tales como en el embarque las astillas y desembarque productos como avena, trigo, soya, Clinker, maíz y gluten la cual lleva realizando estas operaciones desde 1994 en la comuna de coronel la cual en los últimos años a promediado 4.500.000 millones de toneladas anuales siendo un punto clave para la economía local.

Uno de sus principales muelles de carguío de astillas llamado puchoco ha sido el pilar fundamental de esta actividad permitiéndole un flujo operacional de 600 toneladas por hora durante los embarque de dicho producto donde por día se tienen jornadas de trabajo de 22,5 horas dividida en 3 turnos lo que implica una alta demanda de los equipos que posee la instalación es por esto que el mantenimiento de dicha infraestructura juega una labor importante y critica ya que esto permitirá poder finalizar los embarques en los tiempos determinados por contrato con los respectivos clientes.

Para esto se generará una evaluación técnica de incorporación de mantenimientos predictivos permitiendo aumentar la fiabilidad de sus equipos y reducir al máximo las fallas en tiempos no deseados que genere pérdidas económicas para el terminal, donde su principal enfoque será la sensorizacion de los motores que generan la vida de sus cintas transportadoras las cuales en dicho muelle tienen un ancho de 42 pulgadas y un largo total de 880 metros desde el estribo hasta el cabezo del muelle.

## INDICE

INTRODUCCION .....	1
OBJETIVOS .....	2
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
CAPITULO 1: MARCO TEORICO.....	3
1.1 Presentación de la empresa .....	3
1.2 Ubicación de Portuaria Cabo Froward S.A.....	4
1.3 Visión y misión .....	4
1.4Valores .....	4
1.5 Estructura del holding .....	5
1.6 Organización .....	5
1.7 servicios portuarios .....	6
1.8 exportación.....	8
1.9    proceso de embarque.....	9
Capitulo 2: Mantenimiento industrial, tendencias y kpis.....	14
2.1 mantenimiento industrial.....	14
2.1.1 mantenimiento predictivo.....	16
2.2 normativas de mantenimiento .....	17
2.3 KPIs aplicables al mantenimiento.....	18
2.4 Parametros medibles con el m. predictivo .....	18
CAPITULO 3: SITUACION ACTUAL .....	20
3.1 Situación actual de mantenimiento .....	20
3.2 fallas criticas.....	21
3.2.1 Motores de dificil acceso .....	21
3.2.2 Motores principales del sistema .....	23
3.3 analisis ishikawa.....	24
3.4 analisis ABC y FMECA.....	27

CAPITULO 4: PROPUESTA DE MEJORA.....	32
4.1 analisis de mejora de situación actual .....	32
4.2 variantes de sensores .....	33
4.3 Siemens simotic connect 400 .....	33
4.4 beneficios de la implementación.....	35
4.4.1 reducción de fallas no planificadas .....	36
4.4.2 aumento de disponibilidad operacional.....	37
4.4.3 mejora en los tiempos de respuesta.....	38
4.5 justificación económica.....	39
4.5.1 antecedentes de inversión.....	39
4.5.2 costos asociados a detenciones no planificadas .....	39
4.5.3 comparativa costo beneficio.....	40
CONCLUSIONES .....	42
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN .....	44

## **SIGLAS Y SIMBOLOGIA**

- Cabezo: estructura que se encuentra al final del muelle mar adentro donde se realizan las operaciones para la cual fue diseñada dicha infraestructura
- Chip: madera picada o astillada
- Jet Slinger: estructura diseñada para el lanzamiento de chip dentro de las bodegas
- Motonave: embarcación de gran envergadura capaz de transportar carga de un país a otro
- Reclaimer: es un equipo electromecánico utilizado en sistemas industriales cuya función principal es la recuperación controlada de material almacenado en pilas o canchas de acopio,

## **INTRODUCCION**

La presente tesis busca poder dar a conocer parte de los procesos que se llevan a cabo en la empresa portuaria cabo froward la cual es una de las empresas líderes en la materia de la carga y descarga de graneles de diferentes tipos la cual ha logrado mover una enorme cantidad de toneladas de productos la cual a variado de los 6.5 millones de toneladas a las 4.5 millones de toneladas anual, destacando que toda esta cantidad de productos se mueven a través de cintas transportadoras que son las encargadas de movilizarlas desde los buques a las diferentes zonas de acopio como viceversa.

Este terminal portuario cuenta con un gran equipo de mantención de diferentes áreas tales como mantención eléctrica, mecánica y mecánica automotriz los que buscan poder mantener siempre operativo las diferentes aristas de la empresa, donde se llevan labores de mantenimientos del tipo preventivo y correctivo, debido que se requiere evitar en lo máximo la falla debido a las pérdidas económicas que esto genera a la empresa como a su vez una alteración logística que puede afectar a más de un país debido que si el barco genera un retraso este afecta a la programación de su próximo embarque en otro puerto. A su vez el poder ofrecer a sus clientes sistemas de trabajos más eficientes le permite generar nuevos lazos con nuevos clientes al ver la buena capacidad en la materia a la que se dedica el terminal.

Uno de sus mayores riesgos que se pueden tener dentro del proceso de embarque o desembarque es que algunos de los motores neurálgicos del sistema presente una falla en lapsos críticos, ya que son motores de gran envergadura como a su vez encontrarse en el cabezo del muelle generando enormes esfuerzos de diferentes maquinarias y equipos para poder ser llevados a tierra para tener la reparación correspondiente, en base a este punto crítico detectado se han llevado planes de mantenimiento programados, pero aun teniendo estos planes que buscan minimizar los problemas existe la posibilidad de una falla sin poder preverla, en este marco es cuando el mantenimiento predictivo entraría a jugar una labor clave ya que a través de diferentes sensores y equipos que existen en la actualidad podemos monitorear permitiéndonos ser más certeros a la hora de tener que intervenir dichos equipos dando la holgura de poder programar una intervención debido a posibles anomalías que puedan presentarse según los monitores que pueden entregar estos implementos diseñados para el mantenimiento predictivo, dicha incorporación permitirá ser una empresa más atractiva producto de su alta fiabilidad frente a sus pares

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Implementación de equipos electrónicos que permitan aumento de la disponibilidad en cintas transportadoras de chips.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar una descripción de las actividades y funcionamiento de Portuaria Cabo Froward.
- Identificar modo de mantención actual.
- Establecer indicadores de desempeño que aseguren continuidad operacional.
- Evaluación económica de implementación de equipo electrónico para cinta transportadora.

## **CAPITULO 1: MARCO TEORICO**

### **1.1 PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA**

Portuaria Cabo Froward se constituyó como consecuencia de la separación de la sociedad de Agencias Universales S.A, acordada en la segunda junta general extraordinaria de accionistas celebrada el 28 de octubre de 1994, en la ciudad de Valparaíso donde se concentra su directorio, dicha acta se redujo a escritura pública el 18 de noviembre de 1994.

Cabo Froward esta principalmente dirigida a las actividades de exportadores e importadores de diferentes materias primas, donde se diferencia en su profesionalismo en la entrega de servicios logísticos de almacenaje, servicios de transferencia portuaria, servicios de estibas y desestiba, teniendo altos estándares de procedimientos de trabajos, de igual forma cuenta con una infraestructura confiable y acorde a las necesidades de las prestaciones que se realizan a los diversos clientes que le acompañan, permitiéndole ser una de las mejores opciones que se barajan en la octava región al igual que en la región de los lagos con su terminal en la comuna de Calbuco.

*Figura 1- 1: imagen aérea de terminal coronel*



Fuente: [www.froward.cl](http://www.froward.cl)

## **1.2 UBICACIÓN DE PORTUARIA CABO FROWARD S.A**

30°1' 57'' Latitud sur y 73°10' 10'' Longitud Weste

Se encuentra ubicado en la bahía de Coronel

Razón Social: Portuaria Cabo Froward S.A.

Tipo de Puerto: Particular Empresa Navieras

## **1.3 VISIÓN Y MISIÓN**

- Visión: Ser un operador portuario y logístico de clase mundial en transferencias y manejo de cargas
- Misión: proveer servicios especializados en el manejo de graneles participando activamente en la cadena logística de las cargas de exportación, importación y cabotaje, principalmente orientados a los rubros forestales, mineros e industrial en general.

Entrega de servicios especializados en el manejo de cargas generales para la industria acuícola. Para ello contamos con personal altamente calificado, sistemas óptimos y confiables, tecnológicas de primer irden y un verdadero compromiso con la comunidad y el medio ambiente, que permite brindas servicios eficientes, de calidad y sustentables en el tiempo.

Todo esto dentro de un marco de ética, seguridad y una permanente generación de valor para nuestros accionistas.

## **1.4 VALORES**

- Respetto a las personas.
- Conducta ética.
- Desarrollo integral de nuestros trabajadores.
- Seguridad en nuestras actividades.
- Responsabilidad y compromiso
- Liderazgo, trabajo en equipo y mejoramiento continuo
- Crecimiento sustentable.

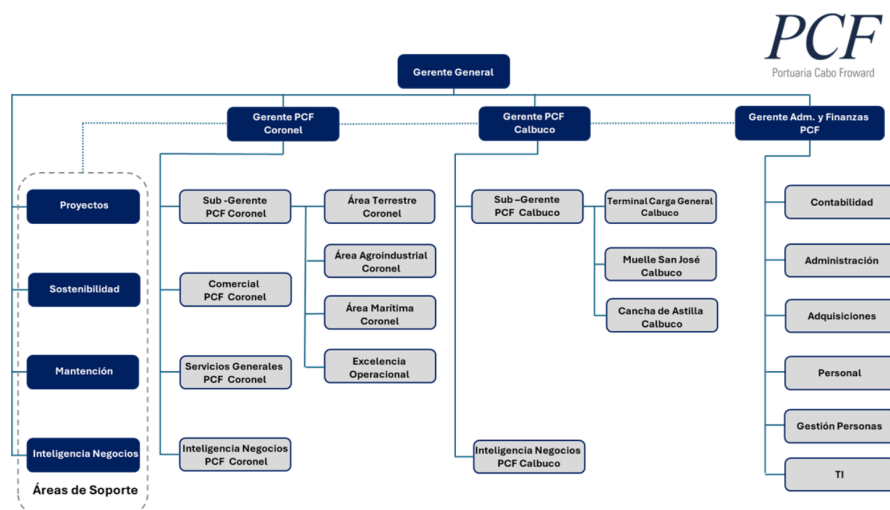
## 1.5 ESTRUCTURA DEL HOLDING

La empresa Portuaria Cabo Froward S.A pertenece al Holding de empresas navieras, al cual están ligadas a la compañía chilena de navegación interoceánicas – CCNI, Agencias Universales S.A. – Agunsa, Empresas mritimas S.A – CPT, entre otras importantes compañías del rubro marítimo portuario.

## 1.6 ORGANIZACIÓN

La sociedad es administrada por un directorio que es el encargado de analizar todas las directrices que posee como empresas el terminal a su vez debe mantener el perfecto funcionamiento tanto de su sede en la comuna de coronel como la que se encuentra en la comuna de Calbuco las que entre si poseen mucha distancia entre una de la otra, pero estas son unificadas en su directorio con base en la región de Valparaíso.

Figura 1- 2: Estructura organizacional de la empresa



Fuente: [www.froward.cl](http://www.froward.cl)

## **1.7 SERVICIOS PORTUARIOS**

En la actualidad, la empresa Cabo Froward ofrece una amplia gama de servicios orientados a la atención de sus distintos clientes, entre los cuales destacan las operaciones de carga y descarga de graneles, así como el almacenamiento de ciertos productos según los requerimientos específicos de cada usuario. Dentro de los materiales que transitan por los terminales portuarios se incluyen chip de madera (madera picada), Clinker —principal insumo para la fabricación de cemento y diversos productos alimenticios, tales como azúcar, trigo, maíz, gluten y cebada, entre otros.

Para ejecutar estas labores, la empresa dispone en la comuna de Coronel de tres terminales operativos: Muelle Puchoco, Muelle Jureles y Muelle Chollín. Este último constituye el terminal más moderno y eficiente, ya que incorpora sistemas avanzados de monitoreo y tecnologías destinadas a la detección temprana de fallas, permitiendo mejorar la continuidad operativa y la confiabilidad del proceso logístico

*1- 3: Canchas de acopio*



Fuente: Google maps

La empresa cuenta con aproximadamente nueve hectáreas de canchas pavimentadas destinadas principalmente al acopio de chip de madera, donde se almacenan grandes volúmenes de material a la espera de su embarque hacia diversos destinos internacionales. Dentro de esta misma área se ubican bodegas techadas, utilizadas para el almacenamiento transitorio de productos alimenticios descargados desde las naves, manteniendo su resguardo hasta su retiro por parte de los clientes según sus requerimientos logísticos.

En el ámbito operacional, el Muelle Puchoco constituye uno de los puntos de mayor actividad dentro del complejo portuario. Este terminal se especializa en la carga de chip de madera, producto exportado principalmente a mercados asiáticos, abasteciendo la demanda de compañías del sector maderero tales como Consorcio Maderero, Comaco y otros actores relevantes de la cadena forestal.

La infraestructura operativa del muelle incluye una cinta transportadora de 800 metros de longitud, encargada de trasladar el material desde el estribo hasta el cabezo. En esta última zona, el chip es distribuido hacia dos torres de carguío, permitiendo mantener un flujo operativo estimado en 600 toneladas por hora.

Este rendimiento es esencial para el cumplimiento de los compromisos contractuales con los clientes, ya que la punta logística portuaria exige un estricto apego a los plazos. Cualquier retraso en la transferencia de carga puede generar impactos significativos en la planificación naviera global, considerando que los itinerarios de las motonaves se programan con alta anticipación y forman parte de una cadena logística internacional altamente sincronizada.

*Figura 1- 4: reclaimer 1*



Fuente: imagen propia

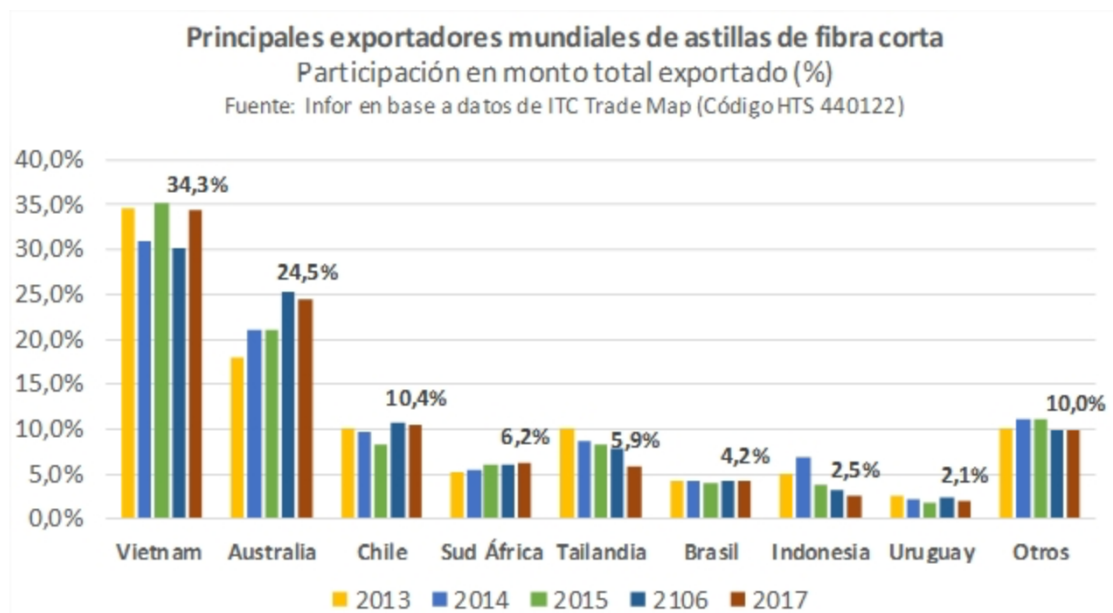
## **1.8 EXPORTACIÓN**

Desde los inicios de la exportación de astillas en Chile, a fines de la década de 1980, el mercado japonés se ha consolidado como el principal destino para este producto. En 1990, su participación superó el 90% del total exportado, reflejando la relevancia estratégica de este país para la industria forestal chilena.

La importancia de Japón se evidencia en sus cifras de importación: entre un cuarto y un tercio del volumen anual de astillas que adquiere a nivel mundial proviene de Chile. Este posicionamiento se debe a las excelentes propiedades técnicas del eucalipto cultivado en territorio nacional, así como al potencial de otras especies, como *Eucaliptus nitens*, que presentan características favorables para la producción de pulpa.

Estos factores han fortalecido una relación comercial sostenida y creciente, posicionando a Chile como un proveedor confiable en el mercado asiático y como un actor relevante dentro de la cadena global de abastecimiento para la industria papelera y maderera japonesa.

*Figura 1- 5: Exportación chilena de astillas*



Fuente: [www.infor.cl](http://www.infor.cl)

## **1.9 PROCESO DE EMBARQUE**

El proceso de carguío en este terminal portuario se inicia en el sector denominado Simas, nombre asignado a las canchas de acopio de chip de madera. Desde este punto comienza el recorrido del material hasta la motonave encargada de transportarlo hacia su destino final.

En el área Simas, el movimiento del chip es realizado por cargadores frontales, los cuales trasladan el material hacia los reclaimers. Estos equipos operan mediante un motor eléctrico de 40 HP, acoplado a una caja reductora que entrega el torque necesario para movilizar los altos volúmenes de material descargados sobre ellos. Adicionalmente, cada reclaimer incorpora un variador de frecuencia (VFD) que permite regular el flujo de carga, asegurando el cumplimiento de los caudales establecidos contractualmente con los clientes.

Una vez el chip es capturado por los reclaimers, este es transferido a un sistema de cintas transportadoras que se encuentra seccionado en tramos debido a la gran distancia y a las condiciones irregulares del terreno que atraviesa. Cada cinta cuenta con su motor eléctrico y su correspondiente caja reductora. En total, desde los reclaimers hasta el punto de embarque se utilizan seis cintas transportadoras, identificadas mediante la nomenclatura C1, C2, C3, C4, C5 y C6, lo que facilita su reconocimiento durante tareas de operación y mantenimiento.

La cinta C3 constituye el tramo más extenso del sistema, alcanzando aproximadamente 800 metros de longitud. Su movimiento es provisto por un motor eléctrico de 200 HP, equipado igualmente con una caja reductora y un variador de frecuencia que permite ajustar la velocidad según las necesidades operacionales.

Una vez la carga completa el recorrido por las cintas principales, llega al cabezo del muelle, donde un sistema de transferencia hidráulico se encarga de distribuir el flujo de material hacia las cintas C4 y C5. Este mecanismo permite alimentar simultáneamente dos bodegas de la motonave, optimizando los tiempos de carga y aumentando la eficiencia operacional del terminal.

El último tramo del proceso corresponde al paso del chip por los jet slinger, dispositivos que permiten orientar la descarga dentro de cada bodega según las instrucciones del estibador. Esta etapa es fundamental para asegurar un carguío uniforme, buscando una compactación óptima del material dentro de las bodegas. Por lo general, cada embarcación recibe un aproximado de 50.000 toneladas de madera chipeada, por lo que la correcta distribución del producto es esencial para mantener la estabilidad y seguridad del transporte.

*Figura 1- 6: traspaso reclaimer a cintas transportadoras*



Fuente: imagen propia

El motor eléctrico en estas instalaciones es uno de los principales actores para que todo este proceso pueda ser llevado a cabo, donde en dicho terminal encontramos 16 motores eléctricos generando diferentes funciones con diferentes potencias eléctricas siendo unos más relevantes que otros, cumplen funciones tales como el movimiento de las cintas transportadoras, movimientos de jet slinger para dirigir la carga dentro de la nave, de igual forma hay ejemplares que realizar movimientos dentro del muelle es por esto que es un pilar fundamental a tener en cuenta en las labores de mantenimiento, las que son designadas a dos áreas en específico como el área eléctrica y mecánica industrial las que realizan sus esfuerzos para permitir una mayor disponibilidad de los equipos.

Tabla 1- 1: Levantamiento de motores eléctricos

Numero	Potencia	Ubicación	Función
1	125hp	C1	Mover cinta c1
2	125HP	C2	Dar movimiento a C2
3	200HP	C3	Mover cinta C3 (la más larga 800 metros)
4	40HP	C4	Mover cinta C4 punto final de carga
5	75Hp	C5	Mover la cinta que lleva la carga al segundo punto de carga
6	40HP	C6	Mover la cinta que lleva al segundo punto final
7	50HP	Pluma T1*	Encargada de levantar la estructura que soporta la cinta C4
8	20HP	Chute jet T1*	Cumple la función de poder recoger los tambores que dan la longitud necesaria para llegar a las partes más bajas de las bodegas de las naves
9	0,5HP	Placa Jet T1*	Es la que dirección el chorro de chips para más o menos alturas, afectando la dispersión de caída del producto
10	1HP	Giro Jet T1	Su función es la de direccionar la carga en sentidos horarios o antihorario según las necesidades
11	0,5HP	Compuerta Jet T1	Permite realizar el cambio entre caída libre de la carga o en su defecto ser lanzado por el jet
12	15HP	Bomba Chute T2	Encargada de recoger los cilindros que extienden la estructura de carguío
13	15HP	Bomba pliegue T2	Permite habilitar la variante de caída libre de la estiba de astillas
14	20HP	Bomba traslación T2	Realiza los movimientos de entrar y sacar la estructura según demanda
15	60HP	Cinta Jet T2	Permite el lanzamiento de las astillas para mejorar la estiba de astillas
16	30HP	Tornamesa T2	Permite los movimientos horizontales para calzar la estructura dentro de la bodega de la nave

T1\*(torre 1) denominación a la torre principal del cabezo puchoco

En la tabla precedente se puede observar la variada cantidad de equipos que se poseen en las instalaciones donde se debe dejar en claro que este es solo uno de los muelles que se está analizando, lo que deja a la reflexión la enorme cantidad de dispositivos que debe mantener en visual el equipo de mantenimiento de las áreas operativas de la empresa.

*Figura 1- 7: Motor reclaimar con caja reductora*



Fuente: imagen propia

Se tiene en cuenta que todos los esfuerzos permanentes que se realizan por el personal para tener una buena disponibilidad de los equipos operativos durante la función de embarque pasan en gran medida por tener un buen servicio a su gran carta de clientela, a su vez siendo de gran impacto el cumplimiento de los tiempos estipulados ya que el atraso de esto significa un daño a la cadena de suministro a nivel país como internacional.

*Figura 1-8: Motonave Corral Star en muelle puchoco*



Fuente: [www.froward.cl](http://www.froward.cl)

El impacto en la cadena de suministro es una variable esencial a la cual las empresas de este rubro deben prestar atención por el motivo que genera un impacto global, se debe tener en cuenta que el atraso de una nave genera que su próximo destino que ya está programado vea las consecuencias de la demora aumentando los costes de almacenamiento, posibilidad de no contar con los equipos correspondientes para su debido atraque de las motonaves, como un factor inmanejable por el hombre como lo es el clima extremo que se pueda presentar, al mismo tiempo las altas demandas de los productos que se transportan pueden aumentar el stock de los consumidores llevando que el mercado aumente sus costes para poder controlar la demanda de productos con demora debido a factores externo, uno de ellos si pueden ser manipulado y mejorado como lo sería el no tener demoras por una buena disponibilidad de los equipos.

## **CAPITULO 2: MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, TENDENCIAS Y KPIS**

### **2.1 MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

El mantenimiento industrial es el control constante de componentes, instalaciones que forman parte de una industria, por medios de trabajos de reparación y revisiones necesarias para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de los activos de una empresa permitiéndoles aumentar su valor, su principal objetivo es evitar, reducir y en caso reparar fallas que se presente dentro de las partes, todo esto permite aumentar la disponibilidad de los componente, no menor disminuye accidente e incidentes que se pueden dar debido a maquinaria en mal estado.

A nivel mantenimiento se pueden desglosar 5 aristas de mantención aplicables en la industria donde ellas son:

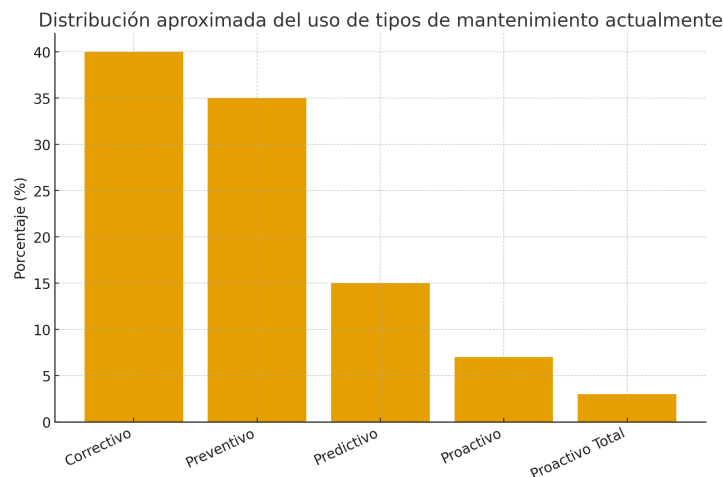
- El mantenimiento correctivo el que se basa en la reparación o sustitución de componentes dañados o deteriorados según sea el caso, este tipo de mantenimientos posee ventajas como desventajas donde las positivas son los bajos costos de aplicación, no requiere planificaciones complejas y lo negativo que este sistema tiene es la detención no programada en momentos críticos, reduce considerablemente la vida útil de los equipos.
- Mantenimiento preventivo es todo aquel que se basa en una mantención e inspección programada por un tiempo preestablecido el que destaca dentro de lo positivo en que nos permite disminuir la posibilidad de fallas debido a su revisión periódica en las desventajas de este tipo de mantenimiento es que puede aumentar los gastos debido a sobremantenimientos.
- Mantenimiento predictivo es toda actividad de seguimiento y diagnóstico que permiten la intervención correctora una vez detectado los síntomas de una falla el que en sus ventajas permite una intervención solo cuando es necesario generando que los gastos sean solo cuando sean necesarios sin ver afectada la vida útil de los equipos, también disminuye las probabilidades de fallas imprevistas, a pesar de todos sus beneficios y bondades tiene puntos negativos los cuales están asociados a los altos costos de su implementación debido a la adquisición de sensores y

softwares compatibles con dicho sistemas lo que también requiere personal altamente capacitado en el análisis e interpretación de datos.

- Mantenimiento proactivo es todo aquel mantenimiento que al momento de realizar una intervención ya sea para reparación o sustitución se realiza desde la raíz de los problemas originados sus aspectos positivos están dado a que permiten la reducción de las fallas permanentes permitiendo la mejora del ciclo de vida de los activos intervenidos lo malo que posee este tipo de mantención es la alta inversión inicial que se debe realizar en su implementación y ejecución, también requiere grandes análisis detallados de RCM, RCA, FMEA.
- Mantenimiento productivo total el que es realizado por el operario desde su puesto de trabajo donde se puede resaltar la maximización de la confiabilidad y disponibilidad a nivel de sistema de la misma manera permite reducir los costos totales de ciclo de vida del activo, pero dentro de lo negativo que tiene esta alternativa es los altos niveles de exigencia organizacionales, requiere una cultura de mejora continua, disciplina y liderazgo.

Visto todas las variables de mantención que se mencionaron anteriormente podemos concluir que el correctivo solo lo utilizaremos en equipos no críticos y de bajo costo, el preventivo se usara cuando se requiere mejorar la confiabilidad de los equipos sin que importen los sobrecostos generados por sustituciones prematuras, el predictivo es un fiel aliado cuando se quiere realizar intervenciones con exactitud para minimizar costos globales, el mantenimiento proactivo es una buena implementación para eliminar la causa raíz eliminando fallas repetitivas y todo esto lo podemos englobar en la opción del mantenimiento proactivo total que junta todas las estrategias disponibles para dar una solución completa a las necesidades.

Figura 2-1 tendencia de uso de los mantenimientos



Fuente: naviera Rotterdam

Gráficamente se observa que a la fecha aún se tiene una gran tendencia en mantenimientos tanto correctivo como preventivos pero los en la actualidad están teniendo una tendencia hacia el predictivo por la eficiencia y fiabilidad de sus instalaciones que quieren mantener los puertos sabiendo que son considerado en Chile infraestructura crítica debido que el 80% de la mercancía a nivel mundial se moviliza por vías marítimas algo que en Chile toma mucha relevancia a su geografía extensa propicia a realizar faenas portuarias de diferente índole, Cabo Froward en este caso es un actor fundamental en la exportación e importación de graneles ya que por sus terminales se tiene una fluctuación de entre 6 a 4 millones de toneladas que pasan por sus muelles durante un año

### **2.1.1 MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

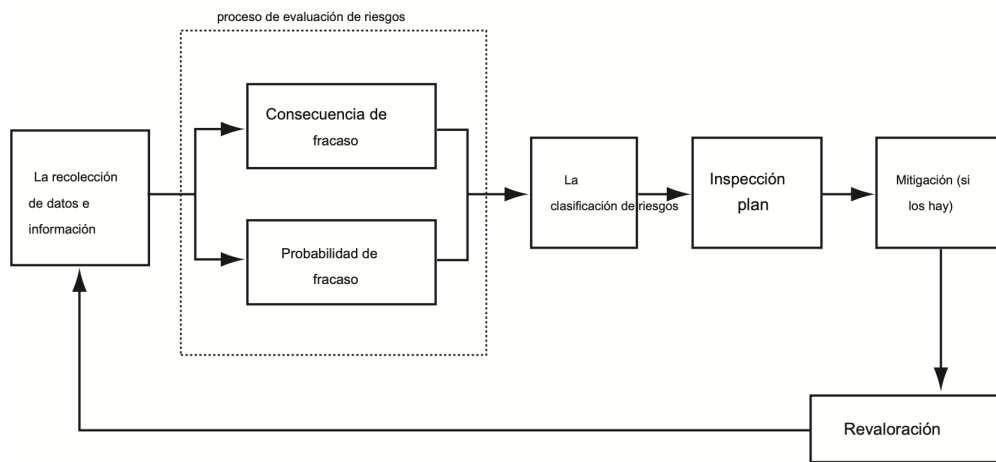
Este proceso es el que se le debe dar un mayor auge debido que las tendencias en la actualidad apuntan a una enorme emigración a este sistema de mantenimiento debido a sus beneficios que entrega para la empresa aumentando el valor de sus activos debido a la alza en la confiabilidad y disponibilidad que pueden lograrse con dicho proceso de mantención, su filosofía se basa en la implementación de sensores que permiten un monitoreo de manera remota y continua en tiempo real de los equipos que se consideran críticos dentro de dichos procesos, actualmente los avances tecnológicos permiten tener mayor disponibilidad de datos de alta relevancia para el personal encargado de los procesos de mantención sumando que la inteligencia artificial avanza a pasos agigantados el cual es un gran aliado dentro de la interpretación de los datos obtenidos durante las mediciones que realizan dichos sensores.

## **2.2 NORMATIVAS DE MANTENIMIENTO**

Como todo proceso industrial se basa en diferentes normas y procedimientos a los que debe regirse para conseguir mejorar los estándares de las instalaciones es por esto que los motores eléctricos los cuales componen este complejo sistema de carguío en el terminal de portuaria cabo froward igual deben estar bajo ciertas normativas que permitan aumentar la duración y disponibilidad de estos equipos rotativos, en base a este preámbulo encontramos que las normas aplicables en estos casos son:

- **IEC 60034** esta norma internacional es aplicable en este puerto debido que se basa principalmente en los requisitos de fabricación para satisfacer la necesidad de un motor que será utilizado en ambientes severos debido a la salinidad marina, ya que pone los parámetros seguros para trabajo en humedad y corrosión con su debido IP.
  
- **IEEE 841** esta normativa es la que mejor se apega a los estándares de motores, norma nacida en estados unidos usada en ambientes industriales muy severos donde en este caso el ambiente marino es considerado severo, esta norma da los parámetros claves a la resistencia a la corrosión y las vibraciones, sus aspectos claves son:
  - i. Pinturas, recubrimientos y materiales resistentes al ambiente salino
  - ii. Normas estrictas de vibraciones
  - iii. Balanceo de rotor más precisas
  - iv. Mejores en sellos, tapas y carcasas para evitar el ingreso de humedad
  - v. Mejoras en las expectativas de confiabilidad en este entorno
  
- **API 580** esta norma fue diseñada por el instituto americano del petróleo que establece las directrices basadas en riesgos en equipos estáticos de instalaciones industriales, donde su objetivo principal es priorizar y optimizar las inspecciones y el mantenimiento según el riesgo que representa cada equipo que compone un sistema, aunque se debe tener en cuenta que no es aplicable a equipos rotativos en este caso como serían los motores eléctricos a los que se les realiza el respectivo análisis si permite basarse en su diagrama de análisis de criticidad.

Figura 2-2 proceso de planificación de inspección basada en riesgos



Fuente: API 580 tercera edición 2016

### 2.3 KPIS APLICABLES AL MANTENIMIENTO

Los KPIs son buenos indicadores que permiten realizar un seguimiento a los equipos analizados permitiendo llevar un historial de fallas generando que se puedan predecir futuras detenciones en base a los datos obtenidos durante el tiempo, es dichos KPIs podemos obtener datos tales como:

- **Disponibilidad operacional** que busca saber si los motores están afectando a la continuidad operacional del puerto
- **MTBF (tiempo medio entre fallas)** permite saber cuánto tiempo puede operar entre las fallas generadas durante el transcurso del tiempo
- **MTTR (tiempo medio de reparación)** permite medir el tiempo que se demora el equipo de mantención en solucionar las fallas presentadas
- **Tendencia de vibración total** es el indicador clave que permite detectar desalineamientos, rodamientos defectuosos
- **Tendencia de temperatura del motor** permite detectar sobrecargas, daños de aislación eléctrica.
- **Índice de criticidad del motor** lo que permite priorizar recursos en equipos que afectan directamente al embarque

### 2.4 PARAMETROS MEDIBLES CON EL M. PREDICTIVO

Con la implementación del mantenimiento predictivo dentro de los puertos se puede mantener una gran cantidad de información en tiempo real permitiendo la planificación

certera y oportuna cuanto esto lo demande a continuación se enlistan parte de factores que se pueden controlar aplicados a este terminal portuario.

- **Análisis de vibraciones** ideal para motores eléctricos debido que permite detectar mediante sus parámetros establecidos desbalances, desalineación o fallas de rodamientos.
- **Termografía infrarroja** aplicable en la verificación de sobrecargas, contactos flojos, desgaste de aislamientos, mala lubricación, fricciones y fallas eléctricas que generen sobrecalentamientos.
- **Análisis de parámetros eléctricos** permite detección de fallas de rotor, estator, armónicos y mala alimentación, sobrecargas y desbalances eléctricos mediante el análisis de corrientes RMS por fase, factor de potencia, desequilibrio de corrientes y voltajes.
- **Análisis de aceites** mediante el análisis de los aceites es permitidos detectar desgastes internos, contaminación, deterioro del lubricante y fallas de engranajes y rodamientos.
- **Ultrasonido**, mediante el análisis del espectro de los sonidos permite detectar cavitaciones, fallas en los rodamientos de los motores
- **Monitoreo en condiciones de tiempo real (Lot/SCADA)**, este sistema permite al personal de mantenimiento tanto los que dan la primera respuesta como los supervisores mantener el control en tiempo real de los parámetros de operaciones dando la facilidad de saber cuándo intervenir de manera oportuna ya que permite detectar, sobrecargas eléctricas, fallas de partes mecánicas de los motores entre otros.

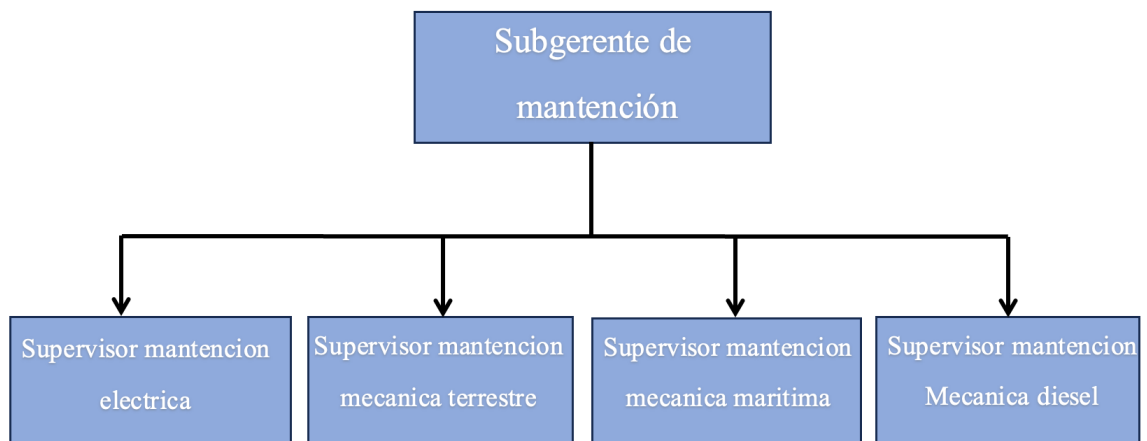
Todos los parámetros antes mencionados poseen una finalidad en común que es la detección de fallas de manera prematura lo que aumenta la disponibilidad de los motores en el caso analizado, estas condiciones van en el directo beneficio del carguío a tiempo de las motonaves que recalán a los puertos de cabo froward, dando cumplimiento a los tiempos pactados por embarque, esto es el resultado del aumento de la confiabilidad de sus instalaciones para la empresa

## CAPITULO 3: SITUACION ACTUAL

### 3.1 SITUACIÓN ACTUAL DE MANTENIMIENTO

La empresa portuaria Cabo Froward, en su sede ubicada en la comuna de Coronel, cuenta con un equipo de mantenimiento estructurado en distintas especialidades con el fin de cubrir integralmente las necesidades operativas de sus instalaciones. Esta organización incluye áreas de mantenimiento eléctrico, mantenimiento mecánico terrestre, mecánica portuaria y mecánica diésel, permitiendo atender los distintos sistemas y equipos que conforman la infraestructura del terminal. Cada una de estas unidades opera bajo una estructura de mando definida, lo que facilita la coordinación, asignación de responsabilidades y ejecución eficiente de las labores de mantenimiento a lo largo del recinto portuario.

*Figura 3.1 diagrama de mando mantención*



El puerto basa actualmente su estrategia de mantenimiento en enfoques preventivos y correctivos, utilizando como herramienta principal el sistema SAP, el cual estructura la programación de actividades en función del tiempo transcurrido. Este mecanismo permite establecer un control ordenado de las inspecciones según la criticidad e importancia operativa de cada equipo dentro del proceso portuario, constituyendo una metodología sólida para la gestión básica de activos.

Sin embargo, uno de los desafíos más relevantes de la empresa Cabo Froward es su amplia extensión geográfica, que obliga al personal de mantenimiento a cubrir grandes distancias

para atender los distintos puntos operativos. Esto implica que los técnicos pueden encontrarse ejecutando una tarea programada que no necesariamente posee criticidad inmediata mientras, simultáneamente, podría originarse una falla en un sector distante del muelle o de la línea de transporte. Esta condición genera tiempos de traslado elevados, lo que se traduce en demoras en la respuesta, prolongación de las detenciones y, en consecuencia, potenciales retrasos en las actividades de embarque.

Dicho retraso impacta de manera directa en la cadena logística y en la continuidad del tráfico naviero, pudiendo incluso generar efectos económicos derivados de interrupciones no planificadas. Todo esto evidencia una limitación inherente a los programas de mantenimiento preventivo basados exclusivamente en intervalos de tiempo y no en la condición real de los equipos.

En este contexto, el mantenimiento predictivo adquiere un rol fundamental, ya que permite optimizar la distribución de recursos, mejorar la eficacia operativa del personal y focalizar los esfuerzos en los activos que realmente lo requieren. La incorporación de sistemas sensoriales y monitoreo continuo habilita una toma de decisiones basada en datos, priorizando las intervenciones según la condición real del equipo y reduciendo significativamente las detenciones inesperadas. Esta estrategia no solo aumenta la confiabilidad del sistema portuario, sino que también mejora la eficiencia global en entornos con múltiples niveles de criticidad operativa.

## **3.2 FALLAS CRITICAS**

### 3.2.1 Motores de difícil acceso

Dentro de las fallas más críticas que pueden presentarse en un sistema tan amplio y complejo como los utilizados en los muelles del terminal portuario, destacan aquellas asociadas a la cinta transportadora. Un corte o daño significativo en la correa implica la detención inmediata de la operación, debido a los derrames, pérdidas de producto y riesgos ambientales que ello conlleva. Este tipo de evento genera un impacto directo en la continuidad operativa, en la seguridad del personal y en los costos asociados a la limpieza, recuperación de material y reparación del sistema.

De igual forma, la falla de los motores eléctricos constituye otro punto crítico dentro del proceso. Muchos de estos equipos poseen una envergadura considerable, muy por encima de los motores estándar disponibles en stock, lo que dificulta una reposición rápida en

caso de avería. A esto se suma que varios motores se encuentran instalados en zonas de difícil acceso, en torres elevadas, pasarelas estrechas o estructuras con limitaciones de izaje. Bajo estas condiciones, un reemplazo por falla severa puede demandar muchas horas de trabajo, recursos adicionales y una planificación especial para maniobras de montaje y desmontaje.

Estas limitaciones no solo retrasan la reanudación del servicio, sino que también aumentan el riesgo operacional y la exposición a detenciones prolongadas, especialmente durante ventanas críticas de embarque o recepción de motonaves. Debido a ello, se vuelve imprescindible contar con sistemas de mantenimiento predictivo y monitoreo en línea, que permitan anticipar fallas, programar intervenciones con tiempo y reducir la probabilidad de incidentes de alto impacto en la operación portuaria.

*Figura 3-2: Motonave Corral Star en muelle puchoco*



Fuente: [www.froward.cl](http://www.froward.cl)

En la ilustración anterior se observa el motor de traslación de la torre 2 del muelle Puchoco, componente fundamental para el desplazamiento controlado de la plataforma de carga. Su función principal es posicionar adecuadamente la estructura durante las maniobras de la motonave, evitando choques, desalineamientos o interferencias durante el proceso de embarque. Esta labor convierte al motor en un elemento crítico dentro de la operación portuaria, especialmente en entornos donde el flujo de carga depende directamente de la correcta movilidad de la torre.

Una de las mayores dificultades asociadas a este equipo es su ubicación en altura, aproximadamente 30 metros sobre el nivel del mar, lo que representa un desafío

significativo en caso de una falla severa que requiera el reemplazo total del motor. La zona no cuenta con vías de acceso ni rutas de izaje adecuadas para mover un motor de gran tamaño, por lo que cualquier intervención mayor podría generar detenciones prolongadas, costos elevados y riesgos operacionales durante un embarque en curso.

Dada esta condición, el mantenimiento predictivo basado en sensores adquiere un rol esencial. La implementación de monitoreo en tiempo real —ya sea a través de sensores de vibración, temperatura, alineación, consumo eléctrico o análisis de tendencias— permite anticipar desviaciones, detectar anomalías tempranas y programar intervenciones antes de que una falla evolucione hacia un evento catastrófico. En este contexto, la predictividad no solo reduce riesgos, sino que también minimiza los costos asociados a mantenimientos correctivos y asegura la continuidad operacional del muelle.

Es importante destacar que no todos los motores presentan el mismo nivel de criticidad. Factores como su función dentro del proceso, frecuencia de uso, impacto operacional en caso de falla y complejidad de acceso influyen directamente en su priorización dentro del plan de mantenimiento. Por ello, el motor de traslación de la torre 2 se considera uno de los equipos más sensibles, dado que su indisponibilidad afecta directamente la operación de embarque y presenta condiciones logísticas adversas para su intervención

### 3.2.2 Motores principales del sistema

Los motores involucrados en la Torre 2 presentan una alta complejidad operativa frente a detenciones no planificadas originadas por fallas no programadas, debido al rol crítico que desempeñan dentro del proceso de carguío. De manera similar, los motores asociados a las cintas transportadoras C2 y C3 constituyen los equipos de mayor criticidad durante la operación normal del sistema, dado que concentran una serie de factores técnicos y logísticos que incrementan significativamente el impacto de una falla inesperada.

En primer lugar, destaca la potencia y tamaño de estos motores. El motor correspondiente a la cinta C2 posee una potencia aproximada de 125 HP, mientras que el motor de la cinta C3 alcanza una potencia cercana a los 200 HP. Estas características implican equipos de gran envergadura, cuyos pesos superan los 600 kg, lo que complejiza considerablemente cualquier actividad de desmontaje, traslado o reemplazo. Este tipo de intervención requiere el uso de equipos auxiliares especializados, tales como grúas de alto tonelaje, además de personal técnico calificado, lo que incrementa los tiempos de reparación y los costos asociados.

Adicionalmente, debido a las especificaciones particulares de estos motores —tanto en potencia como en características constructivas— no se dispone de un stock inmediato de reemplazo, lo que representa una restricción crítica en escenarios de falla no planificada. En caso de requerir un reemplazo completo del motor, los tiempos de adquisición pueden extenderse considerablemente, generando períodos prolongados de indisponibilidad del sistema.

Desde el punto de vista del proceso, las cintas C2 y C3 constituyen las líneas principales de transporte de carga hacia la motonave. A diferencia de otros equipos del sistema, como los reclaimers o las cintas secundarias C1, C4, C5 y C6, estas cintas principales no permiten la implementación de bypass operacionales que mantengan el flujo de material durante una contingencia. En consecuencia, una detención de cualquiera de estos motores provoca una paralización total del proceso de carguío, impactando directamente en los tiempos de operación de la motonave y en el cumplimiento de los compromisos logísticos. Esta situación se ve agravada por la interacción funcional entre las cintas C2 y C3 y los sistemas de rotación y traslación de la Torre 2, cuyos motores también presentan un alto nivel de criticidad. Una falla en cualquiera de estos equipos genera un efecto sistémico, afectando no solo el transporte del material, sino también la capacidad de posicionamiento y operación del sistema de carguío.

En virtud de lo anterior, los motores de las cintas C2 y C3, junto con los motores de rotación y traslación de la Torre 2, deben ser considerados como activos de máxima criticidad dentro del sistema. Estos equipos requieren un enfoque de mantenimiento prioritario, basado en estrategias predictivas y monitoreo continuo, que permitan anticipar fallas, reducir la probabilidad de detenciones no planificadas y asegurar la continuidad operacional del proceso de carguío.

### **3.3 ANALISIS ISHIKAWA**

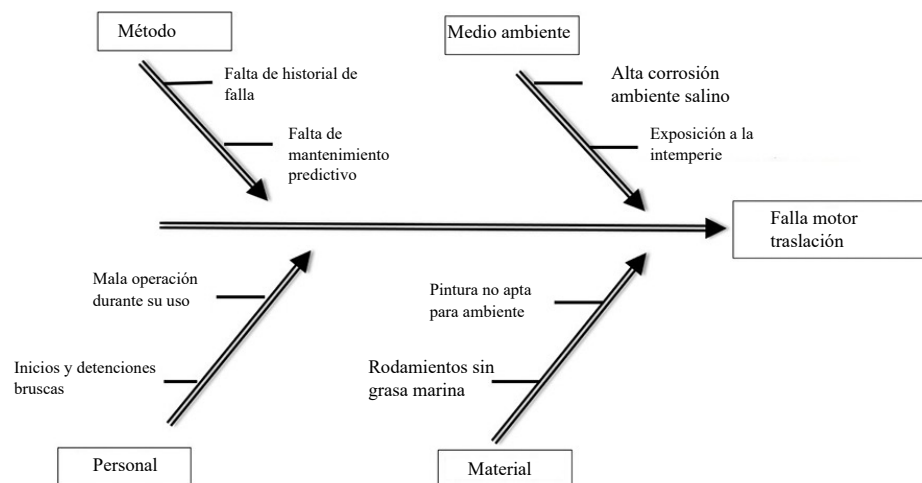
El Diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de espina de pescado, diagrama de causa-efecto, diagrama de Grandal o diagrama causal, es una herramienta gráfica utilizada para identificar, organizar y visualizar las posibles causas que originan un problema específico. Por su forma semejante a la espina de un pez, permite estructurar de manera ordenada categorías de causa principales y secundarias, lo que facilita el análisis sistemático del fenómeno a estudiar. Esta metodología, utilizada ampliamente desde el siglo XX en la industria manufacturera, se ha expandido con éxito a diversos sectores debido a su eficacia, incluido el ámbito portuario y marítimo.

En este caso, el análisis se orienta al equipo industrial ubicado en un entorno marítimo, donde las condiciones operacionales presentan desafíos particulares: alta humedad relativa, presencia de cloruros, variaciones térmicas, exposición a vientos y vibraciones estructurales provenientes del muelle. Estas variables ambientales aportan mayores niveles de desgaste y potenciales fallas, convirtiendo la identificación de causas un aspecto esencial para la confiabilidad operacional del equipo.

El problema analizado se representa en el extremo derecho del diagrama, mientras que a lo largo de la estructura se despliegan las posibles causas primarias que afectan al funcionamiento del conjunto. Desde estas ramas principales emergen líneas perpendiculares que corresponden a causas secundarias, las cuales pueden contribuir directa o indirectamente a la falla del sistema.

A continuación, se observa el análisis de espina de pez realizado al motor de traslación de la torre 2 del muelle Puchoco el cual es uno de los más crítico debido a su ubicación, tamaño y labor que realiza dentro de la instalación portuaria.

Figura 3-3: diagrama de Ishikawa motor traslación torre 2



- **Método**

Los métodos de mantenimiento actualmente utilizados por la empresa presentan importantes oportunidades de mejora. Una parte significativa de los procedimientos sigue sustentándose en estrategias preventivas y correctivas, lo que limita la capacidad de anticipación frente a fallas futuras. Este enfoque tradicional reduce la precisión en la detección temprana de desviaciones y no permite

aprovechar plenamente las ventajas de un sistema basado en condición, donde la información real del comportamiento del equipo es clave para la toma de decisiones. Implementar técnicas predictivas permitiría incrementar la confiabilidad, optimizar recursos y reducir intervenciones no programadas.

- **Personal**

En relación con el personal, es necesario establecer una distinción clara entre los equipos de mantenimiento y los de operaciones. La empresa cuenta con técnicos altamente calificados en las áreas eléctrica y mecánica, quienes aplican rigurosos procesos de inspección, diagnóstico y reparación. Sin embargo, parte de las problemáticas se originan durante la operación del equipo.

Específicamente, se observa que ciertas maniobras ejecutadas por el personal operativo afectan directamente la vida útil de los componentes. Entre ellas destacan las partidas frecuentes, cortas y repetitivas de los motores eléctricos, las cuales generan un estrés térmico considerable. Durante el arranque, un motor eléctrico puede demandar corrientes hasta seis veces superiores a su corriente nominal, provocando sobrecalentamiento de los devanados y componentes internos. Esta condición, cuando ocurre de manera habitual, acelera el desgaste, reduce la eficiencia y aumenta la probabilidad de falla prematura.

- **Material y medioambiente**

Tanto los materiales empleados como el entorno operativo inciden directamente en la confiabilidad del equipo. Considerando que el motor está expuesto de forma permanente a un ambiente marino, resulta fundamental la utilización de grasas y lubricantes adecuados para ambientes salinos, que permitan proteger superficies metálicas, rodamientos y elementos móviles de la corrosión.

El motor de traslación se encuentra ubicado en el cabezo del muelle, aproximadamente a 800 metros de la costa, recibiendo constantemente aire con un alto contenido de salitre. Este factor ambiental es altamente corrosivo para materiales ferrosos y puede acelerar la degradación de carcasas, uniones, terminales y aislaciones.

Asimismo, este motor comparte un nivel de complejidad similar al motor de rotación de la estructura, ya que ambos se encuentran próximos físicamente, poseen dimensiones comparables y cumplen funciones relacionadas. El motor de traslación permite el

desplazamiento de la estructura que transporta madera picada hacia las bodegas ubicadas al costado izquierdo desde la perspectiva del amanecer. Por su parte, el motor de rotación acciona la tornamesa, cuya función es orientar la estructura de carga para alinearla con precisión ante distintas motonaves que atracan en el muelle Puchoco, considerando las variaciones en su eslora.

Esta interacción entre funciones, ubicación y condiciones ambientales hace que ambos motores requieran un enfoque de mantenimiento especializado, tanto en técnicas como en materiales, que considere la severidad del ambiente marino y la criticidad del proceso operativo.

A continuación, se observa una tabla la cual da los parámetros para dar el nivel de criticidad de cada motor mencionado en la tabla 1-1, dicha tabla posee todos los equipos que componen esta larga línea de embarque

### **3.4 ANALISIS ABC Y FMECA**

Con el objetivo de priorizar los activos más relevantes del sistema de carguío, se realizó un análisis de criticidad combinando la metodología ABC con un enfoque FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), considerando criterios técnicos, operacionales y económicos. Esta metodología permite jerarquizar los equipos según el impacto que genera su falla en la continuidad del proceso, la seguridad operativa y los costos asociados.

Dentro del conjunto de motores analizados, los equipos asociados a la Torre 2, así como los motores de las cintas transportadoras C2 y C3, fueron clasificados como activos de criticidad tipo A, es decir, equipos cuya falla genera consecuencias severas y de alto impacto para la operación global del sistema.

Tabla 3-1 criterios para definir criticidad de equipos

Tipo de Equipo	Seguridad y Medio Ambiente	Producción	Calidad	Mantenimiento
<b>A</b> CRÍTICO	Puede originar accidente muy grave.	Su parada afecta al Plan de Producción.	Es clave para la calidad del producto.	Alto coste de reparación en caso de avería.
	Necesita revisiones periódicas (mensuales).		Es el causante de un alto porcentaje de rechazos.	Averías muy frecuentes.
	Ha producido accidentes en el pasado.			Consumen una parte importante de los recursos de mantenimiento (mano de obra y/o materiales).
<b>B</b> IMPORTANTE	Necesita revisiones periódicas (mensuales).	Afecta a la producción, pero es recuperable (no llega a afectar a clientes o al Plan de Producción).	Afecta la calidad, pero habitualmente no es problemático.	Coste medio en Mantenimiento.
	Puede ocasionar un accidente grave, pero las posibilidades son remotas.			
<b>C</b> PRESCINDIBLE	Poca influencia en seguridad.	Poca influencia en producción.	No afecta a la calidad.	Bajo coste de Mantenimiento.

Fuente: Organización y gestión integral de mantenimiento- Santiago García Garrido

Los motores correspondientes a las cintas C2 (125 HP) y C3 (200 HP) presentan una criticidad elevada debido a una combinación de factores técnicos y logísticos. Su elevada potencia implica equipos de gran tamaño y peso, superando los 600 kg, lo que dificulta las labores de desmontaje y reemplazo, incrementando significativamente el MTTR. Estas intervenciones requieren grúas, herramientas especializadas y personal altamente calificado, lo que prolonga los tiempos de indisponibilidad.

Adicionalmente, no se dispone de stock inmediato de reemplazo para motores de estas características, lo que aumenta el riesgo operativo ante una falla catastrófica. Desde el punto de vista del proceso, las cintas C2 y C3 constituyen las líneas principales de transporte de material, sin posibilidad de realizar bypass operacional, a diferencia de otras cintas secundarias (C1, C4, C5 y C6) o reclaimers. En consecuencia, la falla de cualquiera de estos motores provoca una detención total del proceso de carguío, afectando directamente la operación de la motonave.

De manera similar, los motores de rotación y traslación de la Torre 2 presentan una criticidad comparable, ya que su indisponibilidad impide el posicionamiento adecuado del sistema de carguío, generando un efecto sistémico que paraliza la operación completa.

Desde la perspectiva FMECA, los principales modos de falla identificados para estos motores incluyen:

- Fallas mecánicas progresivas (desgaste de rodamientos, desalineamiento)
- Sobre calentamiento por sobrecarga o deficiencia en la ventilación
- Fallas eléctricas incipientes en devanados
- Vibraciones excesivas asociadas a desbalance o deterioro estructural

Tabla 3-1 Análisis FMECA motores rotación y traslación torre 2

Equipo	Modo de falla	Causa raíz	Efecto local	Efecto en el sistema	S	O	D	RPN	Acción recomendada
Torre 2	Falla mecánica	Desgaste de engranajes	Pérdida movimiento	Imposibilidad de carguío	10	5	6	<b>300</b>	Monitoreo vibracional
Torre 2	Sobre calentamiento	Trabajo continuo	Daño térmico	Parada forzada	9	4	6	<b>216</b>	Sensores de temperatura
Torre 2	Falla eléctrica	Humedad, polvo	Cortocircuito	Detención total	9	4	7	<b>252</b>	Diagnóstico eléctrico
Torre 2	Desbalance	Acumulación de material	Vibración elevada	Daño estructural	8	5	8	<b>320</b>	Análisis de vibraciones
Torre 2	Falla de control	Sensor/actuador defectuoso	Pérdida de posición	Riesgo operacional	9	3	7	<b>189</b>	Monitoreo condición

Fuente: propia con datos obtenido con trabajadores en conversaciones

Para comprender esta tabla se debe entender las siguientes siglas

- (S) severidad: impacto de la falla en la operación
- (O) ocurrencia: probabilidad de que ocurra el modo de falla
- (D) Detectabilidad: la capacidad actual de detectar una falla

Los números más altos serán los equipos más críticos dentro de los ya detectados críticos

Tabla 3-2 analisis FMECA cinta C2 y C3

Equipo	Modo de falla	Causa raíz	Efecto local	Efecto en el sistema	S	O	D	RPN	Acción recomendada
C2 / C3	Falla de rodamientos	Fatiga, lubricación deficiente	Aumento vibración	Detención total del carguío	8	6	7	<b>336</b>	Monitoreo vibracional continuo
C2 / C3	Sobrecalentamiento	Sobrecarga, mala ventilación	Aumento temperatura	Daño al devanado	9	5	6	<b>270</b>	Monitoreo térmico
C2 / C3	Falla de aislamiento	Envejecimiento, humedad	Cortocircuito	Parada inmediata	10	4	7	<b>280</b>	Análisis eléctrico predictivo
C2 / C3	Desalineación	Montaje deficiente	Vibración excesiva	Daño mecánico progresivo	10	5	8	<b>400</b>	Análisis de vibraciones
C2 / C3	sobreconsumo	Carga excesiva	Disparo protecciones	Interrupción operación	10	4	8	<b>320</b>	Monitoreo de corriente

Ambas tablas comparten el mismo desglose para su debida comprensión, se observa en ellos que son equipos altamente críticos dentro del proceso de embarque del muelle puchoco.

Estos modos de falla presentan una alta severidad, una probabilidad moderada a alta y un impacto económico significativo, lo que eleva el nivel de riesgo asociado al activo.

A partir del análisis de criticidad, se identifican los siguientes indicadores de riesgo operativo para los motores clasificados como críticos tipo A:

- Alto MTTR: debido a la complejidad del reemplazo y a la falta de stock inmediato.
- Baja tolerancia a la falla: ausencia de redundancia o bypass.
- Alto impacto sistémico: una falla individual detiene el proceso completo.
- Alta exposición logística: afectación directa en los tiempos de carguío y despacho de la motonave.

Estos indicadores posicionan a los motores C2, C3 y Torre 2 como puntos únicos de falla (Single Point of Failure) dentro del sistema.

Desde el punto de vista económico, la detención de las cintas C2 o C3 genera costos asociados a:

- Pérdida de horas productivas de embarque.
- Costos de oportunidad por retraso en la operación de la motonave.
- Incremento en costos de mantenimiento correctivo de emergencia.
- Uso ineficiente de recursos humanos y equipos auxiliares.

Considerando que una detención puede extenderse por varias horas, el impacto económico acumulado por evento resulta significativamente superior al costo de implementar una estrategia de monitoreo predictivo.

## **CAPITULO 4: PROPUESTA DE MEJORA**

### **4.1 ANALISIS DE MEJORA DE SITUACIÓN ACTUAL**

A partir del preámbulo desarrollado en los capítulos anteriores, se puede concluir que la empresa ha contado históricamente con sistemas de mantenimiento que han resultado funcionales y adecuados para cada etapa de su evolución. A lo largo de los años, la organización ha mostrado la capacidad de adaptarse a los distintos desafíos operacionales, incorporando mejoras y ajustando sus prácticas en función de las necesidades del entorno y del mercado.

En este contexto, el mantenimiento predictivo se perfila como la alternativa más eficiente y estratégica frente a los retos actuales y futuros, especialmente considerando la creciente competitividad entre los puertos. La capacidad de anticipar fallas, optimizar la disponibilidad de los equipos y asegurar la continuidad operacional se ha transformado en un diferenciador clave que permite a cada terminal portuario obtener ventajas frente a sus pares.

Del análisis realizado al sistema de mantenimiento vigente, se evidencia que la empresa opera principalmente bajo un enfoque preventivo, orientado a incrementar la disponibilidad y confiabilidad de sus activos mediante intervenciones programadas. No obstante, aún persiste un porcentaje de actividades correctivas que se ejecutan cuando la falla ya se ha manifestado, lo cual genera impactos no deseados en la operación, los costos y la planificación.

La transición hacia un modelo predictivo permitiría reducir significativamente estas intervenciones reactivas, mejorar la gestión del ciclo de vida de los equipos y fortalecer la toma de decisiones basada en datos reales de condición. De este modo, la empresa no solo modernizaría su sistema de mantenimiento, sino que también alinearía sus procesos con las mejores prácticas internacionales aplicables al sector portuario.

Para esto una mejor significativa para su mejora en la confiabilidad y disponibilidad de sus equipos es la incorporación de sensores en sus motores los que permitan realizar un monitoreo de manera remota donde entra a jugar una labor fundamental para este caso el equipo Siemens simotics connect 400.

## **4.2 VARIANTES DE SENSORES**

Para la necesidad de implementar equipos que permitan migrar al sistema de mantenimiento preventivo se pueden encontrar varias opciones que puedan dar respuesta a esta necesidad. A continuación, se observa varias a esta demanda:

- **ifm Detector de vibraciones VVB302:** es un sensor industrial robusto con análisis integrado de vibración y temperatura, puede detectar fallas tempranas como desbalance, impactos, desgaste de rodamientos
- **Wireless IoT Vibration Monitoring System:** es un sensor que está pensado y diseñado para ser instalado en lugares de difícil acceso debido a su conectividad inalámbrica, está diseñado para muestras básicas de temperatura y vibraciones.
- **Siemens simotics connect 400:** está diseñado para Monitorear múltiples parámetros (vibración 3 ejes, temperatura y parámetros eléctricos), Integración con plataforma MindSphere y análisis avanzado de condición y mantenimiento predictivo e Ideal para gestionar flotas completas de motores y obtener KPIs avanzados.

Una vez analizadas tres alternativas de sensores destinadas a la medición de variables asociadas al funcionamiento de motores eléctricos, se observa que, si bien todas cumplen una finalidad común de monitoreo de condición, la solución **Siemens SIMOTICS Connect 400** destaca por su mayor capacidad de adquisición y procesamiento de información. Esta variante permite obtener un conjunto más amplio de parámetros operativos de manera integrada y con una menor complejidad de implementación, facilitando la interpretación de datos y la toma de decisiones en estrategias de mantenimiento predictivo, en comparación con las otras alternativas evaluadas.

## **4.3 SIEMENS SIMOTIC CONNECT 400**

El sistema Siemens Simotics Connect 400 constituye una mejora significativa para la gestión de mantenimiento en la operación de Cabo Froward, particularmente en la línea de embarque de astillas. Este dispositivo ha sido diseñado para habilitar el monitoreo remoto y continuo de los motores involucrados en el proceso, permitiendo la captura, procesamiento y transmisión de datos operacionales relevantes. Su incorporación facilita la detección temprana de desviaciones en el comportamiento del motor, lo que posibilita intervenir las fallas de manera oportuna antes de que evolucionen hacia eventos de mayor criticidad.

La principal ventaja para el personal de mantenimiento radica en la capacidad del sistema para priorizar intervenciones, focalizando los recursos en aquellos equipos con mayor probabilidad de falla. Esto es particularmente relevante debido a la extensa dispersión geográfica de los equipos en la línea de embarque, donde cada desplazamiento implica tiempos considerables. Al actuar directamente sobre los motores que presentan anomalías, se optimizan los tiempos de respuesta y se reducen los atrasos asociados al proceso de carguío y embarque.

Para comprender el valor agregado del sensor, es necesario identificar las variables operacionales que este dispositivo es capaz de medir y analizar. Entre los principales parámetros monitoreados se encuentran: Vibración

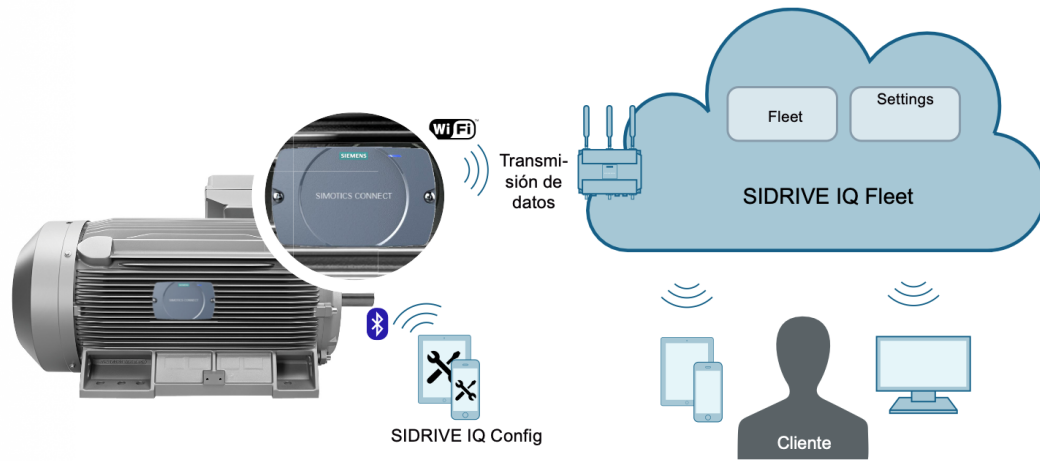
- Vibraciones en distintas direcciones, permitiendo identificar fallas mecánicas tales como desbalance, desalineamiento o deterioro de rodamientos.
- Temperatura tanto del estator como del ambiente circundante, lo que permite evaluar sobrecarga térmica, insuficiencia de ventilación y condiciones operativas inadecuadas.
- Datos eléctricos asociados al comportamiento del motor, tales como corriente y potencia, que permiten identificar fallas internas o ineficiencias energéticas.
- Tiempos efectivos de operación, útiles para la estimación de ciclos de vida y la planificación de mantenimiento basado en condición.
- Ciclos de carga, fundamentales para determinar variaciones en la demanda mecánica y su impacto en el desgaste.
- Condiciones ambientales, como humedad o temperatura externa, que pueden influir en la degradación del equipo.

Una vez capturados estos parámetros, el sistema ejecuta un proceso de análisis interno, mediante el cual identifica tendencias, patrones y comportamientos anómalos respecto del perfil operativo histórico del motor. Posteriormente, estos datos son transmitidos a la plataforma Sidrive IQ, donde un motor analítico basado en inteligencia artificial y aprendizaje automático procesa la información y genera indicadores de condición, reportes automáticos y alertas predictivas.

Este enfoque de monitoreo predictivo permite que el personal de mantenimiento pueda dedicar sus recursos a actividades de mayor valor, interviniendo únicamente cuando los algoritmos del sistema detecten condiciones anormales. De esta manera, se reduce la

dependencia del mantenimiento correctivo no planificado, disminuye el tiempo fuera de servicio de los motores y se mejora la continuidad operacional del sistema de embarque.

Figura 4-1 diagrama de operación



Fuente: manual siemens simotics connect 400

#### **4.4 BENEFICIOS DE LA IMPLEMENTACIÓN**

La incorporación de sensores Siemens Simotics Connect 400 en los motores críticos del sistema de embarque permite transformar el enfoque tradicional de mantenimiento, evolucionando desde un modelo correctivo-preventivo hacia un esquema predictivo basado en condición real. A continuación, se detallan los beneficios esperados tras su implementación.

Figura 4-2 beneficios de sensor siemens



Fuente: siemens.com

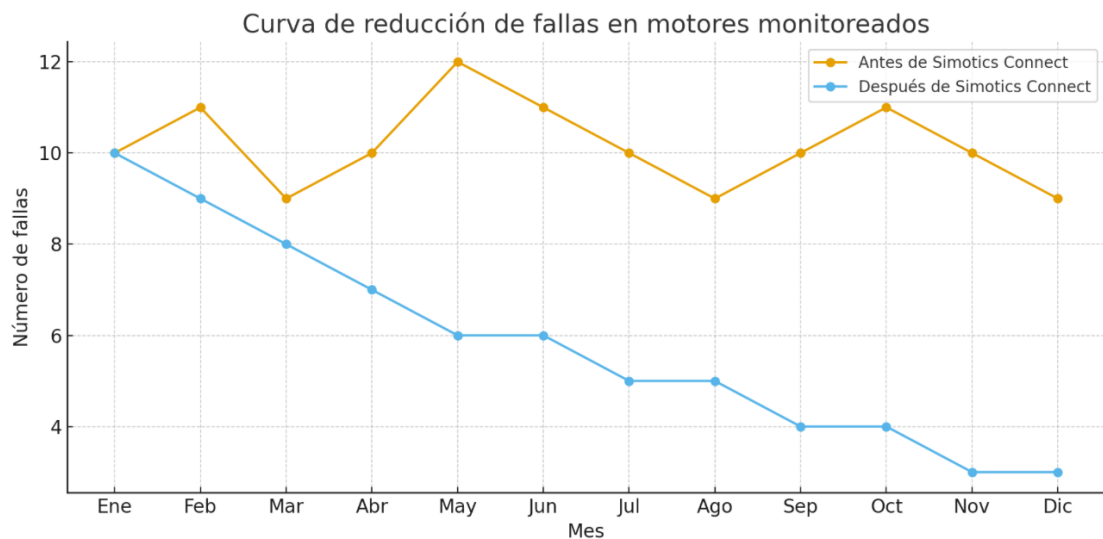
#### 4.4.1 reducción de fallas no planificadas

La literatura técnica y los benchmarks entregados por Siemens indican que la aplicación de sistemas de monitoreo predictivo permite reducir entre un 30% y un 50% la ocurrencia de fallas críticas en motores eléctricos industriales. Esta disminución se explica por varios factores:

- **Detección temprana de modos de falla:** El sensor registra vibraciones, temperatura y datos eléctricos del motor, permitiendo identificar comportamientos anómalos asociados a desalineamiento, desgaste de rodamientos, sobrecarga eléctrica o defectos estructurales.
- **Intervenciones planificadas basadas en pronóstico:** Los algoritmos de Sidrive IQ construyen tendencias y proyectan la evolución del deterioro, alertando al personal cuando el equipo se acerca al umbral de falla.
- **Prevención de fallas catastróficas:** Al intervenir antes del colapso, se evita que componentes menores (rodamientos, acoplamientos) generen daños mayores en ejes, estatores o carcasa.

La reducción de fallas no planificadas impacta directamente en la continuidad operacional y disminuye la probabilidad de detenciones prolongadas que afectan el ritmo de embarque.

Figura 4-3 desempeño esperado



Fuente: elaboración propia

#### 4.4.2 aumento de disponibilidad operacional

La disponibilidad operacional del sistema depende de la frecuencia y duración de las detenciones. Al contar con monitoreo predictivo:

- Las fallas se identifican en estado incipiente, antes de que comprometan la operación.
- Las intervenciones se programan estratégicamente en momentos de menor impacto productivo.
- Se reducen los tiempos de diagnóstico, ya que el sensor entrega la condición del motor y la probable causa de la anomalía.

Por ello, se estima un incremento de 2% a 4% en la disponibilidad global de la línea. Si bien este número podría parecer moderado, en sistemas de alta continuidad –como el embarque de astillas– incluso una mejora marginal se traduce en:

- Incrementos significativos de toneladas embarcadas por turno.
- Menor variabilidad del flujo productivo.
- Menor presión operacional en equipos auxiliares.

En la práctica, este incremento de disponibilidad significa operar más tiempo sin interrupciones inesperadas.

#### 4.4.3 mejora en los tiempos de respuesta

La línea de embarque en Cabo Froward presenta una disposición geográfica extensa, lo cual implica que el personal debe recorrer amplios tramos para inspeccionar o verificar la condición de motores distribuidos a lo largo del muelle. Esto genera tiempos muertos y baja eficiencia del recurso humano.

La implementación del sistema Simotics Connect 400 permite:

##### **a) Reducción de desplazamientos innecesarios**

El personal recibe información en línea sobre qué motores presentan riesgo, evitando recorridos de inspección física que no aportan valor.

##### **b) Priorización basada en datos**

Los motores son intervenidos según:

- severidad de las vibraciones,
- tendencias térmicas,
- magnitud de las anomalías detectadas por la IA.

Esto posibilita atacar directamente los activos que representan un riesgo real para la continuidad del proceso.

##### **c) Optimización del recurso técnico**

Los especialistas pueden distribuir su tiempo de forma eficiente, dedicándolo a:

- diagnósticos avanzados,
- trabajos de mayor complejidad,
- planificación táctica del mantenimiento predictivo.

En resumen, la mejora en tiempos de respuesta se traduce en menor tiempo de espera entre la detección y la intervención, lo cual disminuye la probabilidad de que una falla incipiente evolucione hacia una detención completa del sistema.

## **4.5 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA**

### 4.5.1 antecedentes de inversión

El sistema propuesto considera la implementación de sensores Siemens SIMOTICS Connect 400 en 10 motores críticos del sistema de embarque de astillas, incluyendo motores asociados a las cintas C2, C3 y a los sistemas de rotación y traslación de la Torre 2, previamente identificados como equipos de alta criticidad operacional.

El costo de adquisición del pack de 10 sensores asciende a:

**Inversión inicial total:  
\$755.650 CLP incluido IVA**

Este valor corresponde exclusivamente a los sensores, sin considerar obras civiles mayores, dado que su instalación es no invasiva y compatible con equipos existentes.

### 4.5.2 costos asociados a detenciones no planificadas

El proceso de embarque se encuentra altamente condicionado por el desempeño de los motores principales de las cintas C2, C3 y Torre 2, los cuales no disponen de alternativas de bypass. En consecuencia, una falla no programada en estos equipos genera una detención total del carguío de la motonave.

Desde el punto de vista económico, se consideran los siguientes impactos:

- Penalización contractual por atraso:  
\$15.000.000 CLP por día
- Bonificación por término anticipado:  
\$7.500.000 CLP por día

Estos valores evidencian una alta exposición económica al riesgo operacional, lo que refuerza la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento predictivo.

A continuación, se puede observar los valores obtenidos por el proveedor nacional el cual lo exporta en un periodo de 4 a 6 meses.

Figura 4-4 cotización equipo propuesto



Dirección de la  
compañía

Vicuña Mackenna 1503  
8360322 Santiago RM  
CL

Fecha de creación 15/12/2025  
Número de  
cotización 00060608

Ejecutivo Franco Gonzalez Cea  
Teléfono +56 931974795  
Email franco.gonzalez@lureye.cl

Contacto Daniel Cisternas  
Celular 940782276  
Email danielcisternab99@gmail.com

#### Información del cliente

Cliente DANIEL CISTERNAS  
RUT 19852655-K  
Facturación , ,  
Despacho , ,

Producto	Descripción de Ítem	Cantidad	Precio de venta	Precio total
PROD. ESP	Connection Module IOT bundle Código: 9SA2054-0AA02-0AB0 Plazo de entrega: 4 a 6 semanas	1,00	CLP 635.000	CLP 635.000

Total CLP 635.000  
IVA 19% CLP 120.650  
Total + IVA CLP 755.650

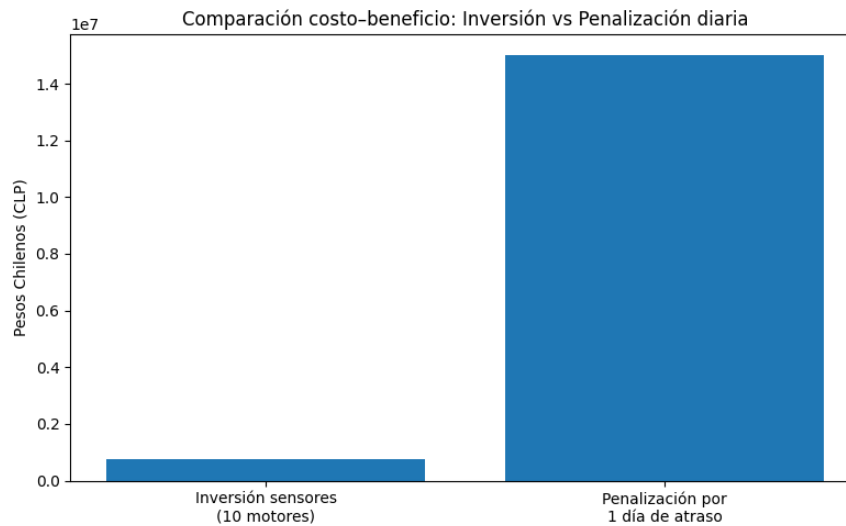
Fuente: lureye.cl

#### 4.5.3 comparativa costo beneficio

La ocurrencia de un solo día de detención no planificada en el sistema de embarque genera un impacto económico significativamente superior a la inversión requerida para implementar el sistema de monitoreo predictivo mediante sensores Siemens SIMOTICS Connect 400. Esta desproporción evidencia el alto nivel de exposición económica asociado a la operación de los motores críticos previamente identificados en el análisis de criticidad.

La penalización de un día de atraso en el proceso de embarque genera un impacto económico de 15.000.000 versus la implementación de los 10 sensores que pueden abarcar 10 motores incluyendo los más críticos que se detallan anteriormente, llevándolo a un monto de 755.650 pesos lo que llevaría que la penalización sea 19,85 veces la inversión inicial de esta implementación.

Figura 4-5 comparativa de costos



Fuente: elaboración propia

Como se observa, el costo asociado a un solo día de atraso en el proceso de carguío es casi veinte veces superior al monto total de la inversión en instrumentación predictiva. Este resultado pone de manifiesto que el impacto económico de una falla crítica no solo supera ampliamente el costo del sistema de monitoreo, sino que además compromete directamente la rentabilidad y continuidad operacional del proceso.

Desde una perspectiva financiera, esta relación implica que la inversión total se recupera evitando apenas el 5,0% de un día de detención, lo que equivale aproximadamente a 1,2 horas de operación detenida. En términos prácticos, basta con que el sistema permita anticipar o mitigar parcialmente una sola falla crítica para que la inversión se encuentre completamente amortizada.

Este escenario adquiere aún mayor relevancia al considerar que los motores analizados corresponden a activos de alta criticidad (Clase A), cuya falla provoca la detención total del sistema de embarque, sin alternativas operacionales de bypass. En consecuencia, la implementación del sistema de monitoreo predictivo no debe ser evaluada únicamente como una mejora técnica, sino como una herramienta de gestión del riesgo económico, orientada a reducir la probabilidad de incurrir en penalizaciones contractuales de alto impacto.

En síntesis, la comparación directa entre la inversión y el riesgo económico asociado a las detenciones no planificadas demuestra que la solución propuesta presenta una relación costo-beneficio altamente favorable, justificando plenamente su implementación desde el punto de vista económico y estratégico.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente tesis permitió analizar en profundidad el impacto que generan las detenciones no planificadas de motores eléctricos críticos en un sistema de carguío portuario, evidenciando que dichas fallas constituyen uno de los principales factores de riesgo operativo y económico para la continuidad del proceso productivo. A través de la aplicación de metodologías de análisis de criticidad tipo ABC y FMECA, fue posible identificar que los motores asociados a la torre 2 y a las cintas transportadoras C2 y C3 presentan los niveles más elevados de criticidad, debido a su alta potencia instalada, complejidad de reemplazo, inexistencia de redundancia operativa y consecuencias directas sobre la detención total de la operación de carguío de la motonave.

El análisis técnico demostró que estos motores concentran modos de falla con altos índices de severidad, probabilidad de ocurrencia y dificultad de detección, lo que incrementa significativamente el riesgo de fallas catastróficas sin aviso previo. En este contexto, la incorporación de tecnologías de monitoreo predictivo mediante sensores SIMOTICS Connect 400 se presenta como una solución técnicamente sólida, al permitir la supervisión continua de variables críticas como vibración, temperatura y condiciones eléctricas, facilitando la detección temprana de fallas incipientes y la planificación oportuna de intervenciones de mantenimiento.

Desde el punto de vista económico, la evaluación costo–beneficio evidenció que la inversión requerida para implementar el sistema de monitoreo en diez motores críticos, equivalente a \$755.650 CLP, resulta marginal en comparación con el impacto económico asociado a una sola jornada de detención no planificada, cuya penalización asciende a \$15.000.000 CLP. Esta relación demuestra que la inversión se recupera evitando apenas una fracción mínima de un día de detención, lo que se traduce en un período de retorno prácticamente inmediato y en un retorno sobre la inversión altamente favorable.

Adicionalmente, la implementación del sistema propuesto contribuye de manera directa a mejorar la disponibilidad operacional de la línea de embarque, optimizar la asignación de recursos humanos, reducir desplazamientos innecesarios en instalaciones de gran extensión geográfica y fortalecer la toma de decisiones basada en datos objetivos. Todo ello se alinea con los principios de la ingeniería de mantenimiento moderna y con las estrategias de mantenimiento predictivo e Industria 4.0.

En conclusión, se establece que la instalación de sensores SIMOTICS Connect 400 en los motores eléctricos de mayor criticidad no solo es técnicamente recomendable, sino

también económicamente justificada, constituyéndose en una medida estratégica para la mitigación del riesgo operativo, la reducción de costos por mantenimiento correctivo y la mejora de la confiabilidad global del sistema de carguío. La solución propuesta aporta valor tangible a la operación industrial y sienta las bases para una gestión del mantenimiento más eficiente, segura y sostenible en el tiempo.

## **BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE LA INFORMACIÓN**

- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution* (2nd ed.). Milwaukee: ASQ Quality Press.
- NEMA. (2016). NEMA MG 1: Motores y Generadores. Asociación Nacional de Fabricantes de Electricidad.
- IEEE. (2013). IEEE Std 1415™: Guía para pruebas de mantenimiento de maquinaria de inducción y análisis de fallas. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- Siemens AG. (2023). SIMOTICS Connect 400 - Solución de monitoreo de condiciones para motores eléctricos. Industrias digitales de Siemens.
- Siemens AG. (2023). SIDRIVE IQ - Servicios digitales para sistemas de accionamiento. Industrias digitales de Siemens.