



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

**“ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL
ÍNDICE DE SALUD DE ACTIVOS PARA UN SISTEMA DE BOMBAS DE
DESCARGA DE ESTANQUES DE GNL Y SU CORRELACIÓN CON LA
CONFIABILIDAD INDUSTRIAL”**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL con licenciatura en
ingeniería.

Alumno:

Joaquín Antonio Lara Collao

Profesor Guía:

Dr. Mg. Ing. Carlos Alberto Parra Márquez



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: ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL ÍNDICE DE SALUD DE
ACTIVOS PARA UN SISTEMA DE BOMBAS DE DESCARGA DE ESTANQUES DE GNL Y SU
CORRELACIÓN CON LA CONFIABILIDAD INDUSTRIAL

Nombre del candidato(a): Joaquín Lara Collao

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Viña del Mar ; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Parra Márquez, 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: 26-09-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26-09-2025

; Firma:

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



DEDICATORIA

A mi familia... En especial a mi ejemplo, mi Padre. Espero, con fe, que no nos dejarás en mucho tiempo más.



RESUMEN

La implementación de la metodología del Índice de Salud de Activos (AHI) para bombas criogénicas de baja presión en una planta de regasificación de gas natural licuado (GNL) ha demostrado ser una herramienta efectiva para optimizar estrategias de mantenimiento predictivo y proactivo. Este estudio aplica el marco normativo DNO Common Network, integrando datos operativos y de mantenimiento para calcular el índice dinámico de salud que se correlaciona con la confiabilidad del equipo y el riesgo de fallas. Utilizando parámetros de la distribución de Weibull ajustados por modificadores de condición, la metodología permite un ajuste dinámico de la probabilidad de falla preexistente por modelos estocásticos facilitando la toma de decisiones para reducir paradas no planificadas y costos de mantenimiento. El análisis comparativo de múltiples bombas evidencia una reducción significativa de gastos operativos y de inversión cuando se emplea una reducción significativa de gastos OPEX y CAPEX con un enfoque basado en AHI, en comparación a estrategias tradicionales. Este trabajo confirma que la transición desde mantenimientos correctivos y preventivos hacia modelos predictivos basados en condición mejora la eficiencia operativa y la sostenibilidad económica de activos industriales críticos. Se recomienda extender la aplicación a otros equipos de alta criticidad en la organización.

KEYWORDS:

1. ÍNDICE DE SALUD DE ACTIVOS
2. GESTION DE ACTIVOS INDUSTRIALES
3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO
4. BOMBAS CRIOGÉNICAS DE BAJA PRESIÓN
5. REGASIFICACIÓN DE GAS NATURAL LICUADO
6. CONFIABILIDAD OPERACIONAL
7. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL
8. MONITOREO DE CONDICIÓN DE SALUD
9. MODIFICADORES DE SALUD Y CONFIABILIDAD
10. MATRIZ FMECA
11. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CONFIABILIDAD
12. INDICADORES DE CRITICIDAD
13. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENDO BASADOS EN AHI



ÍNDICE

DEDICATORIA	2
RESUMEN	3
ÍNDICE	4
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	9
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVO GENERAL	2
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1 Antecedentes Generales	4
1.1.1. Misión	5
1.1.2. Visión	5
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	6
1.2.1 Descarga	6
1.2.2. Almacenamiento.	6
1.2.3. Regasificación.	6
1.3 Sistema de llenado de estanques	7
1.4 Sistema de control de estanques y almacenamiento	8
1.5 Bombas de baja presión (LP)	9
1.6 justificación de elección de activo	11
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO, IMPLEMENTACIÓN AHI.	14
2.1 Fundamentos de aplicación	17
2.2 Procedimiento de cálculo del AHI	19
2.1.1 Modificador de salud (Ms)	25
2.1.2 Modificador de carga (Mc)	25
2.1.3 Modificador de confiabilidad (Mf)	26
2.3 Distribución de Weibull	26



2.4	Índices de salud y los regímenes de falla de la distribución de Weibull	30
2.5	FMECA para asignación de modificadores	32
CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO, IMPLEMENTACIÓN DEL AHI		36
3.1	Bomba Criogénica, Estanque 101	37
3.2	ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONFIABILIDAD Y SALUD BOMBAS LP101A Y LP101B	47
3.2.1.	Aplicación de la metodología AHI e Interpretación con Weibull	47
3.2.2.	Discusión de hallazgos	49
3.3	Caso escenario, análisis de confiabilidad e índices de salud	51
3.4	Impacto económico de implementación de la metodología.	54
3.5	Limitaciones de la metodología y proyecciones	57
3.6	Discusiones finales	58
3.7	Conclusión	59
Bibliografía		60
ANEXOS		63



ÍNDICE DE FIGURAS, GRÁFICOS Y TABLA.

Tablas

Tabla 1-1.	Presiones de alarma, elaboración propia.....	8
Tabla 1-2.	Datos de la bomba, operaciones.	10
Tabla 1-3.	Datos operativos del motor eléctrico.	10
Tabla 1-4.	Frecuencia de fallas y costes, Informe DNV (2014).	12
Tabla 1-5.	Extracto activo fuera de servicio.	13
Tabla 2-1.	Rangos de banda HI, DNO.	19
Tabla 2-2.	Distancia a la costa, Elaboración propia.	22
Tabla 2-3.	Altura al nivel del mar, Elaboración propia.....	22
Tabla 2-4.	Temperatura anual promedio, Elaboración propia.	22
Tabla 2-5.	Exposición a la atmósfera, Elaboración propia.	23
Tabla 2-6.	Partículas en la atmósfera, Elaboración propia.....	23
Tabla 2-7.	Vida útil estimada.	30
Tabla 2-8.	Estrategias de mantenimiento basado en HI.	31
Tabla 2-9.	FMECA, a partir de reporte DNV (2014).....	33
Tabla 3-1	Bomba 101C, Identificación equipo ISO 14224.....	37
Tabla 3-2	Paso a paso, DNO 2021.	38
Tabla 3-3	HI derivado de la tasa de envejecimiento, ecuación 2-4.....	39
Tabla 3-4	Modificadores de salud.....	42
Tabla 3-5	Modificadores de confiabilidad.	42
Tabla 3-6	Coefficiente de ajuste, extraído de la tabla matriz.	44
Tabla 3-7	Factor de ajuste a la confiabilidad y su proyección.	45
Tabla 3-8	R(t) LP101A y su confiabilidad ajustada.....	48
Tabla 3-9	R(t) LP101B y su confiabilidad ajustada.	48
Tabla 3-10	Escenario respectivo a cada bomba.	52
Tabla 3-11	Costos implementación CBM+AHI, 2025.....	54



Tabla 3-12	Extracto impacto económico LP101C.	55
Tabla 3-13	Métricas financieras impl. AHI.	56

Figuras

Figura 1-1	Planta GNL (Fuente: Google)	4
Figura 1-2	Accionistas GNL (Fuente: GNL.com)	5
Figura 1-3	Flujo de descarga de bomba LP, proceso del GNL	9
Figura 1-4	Nivel NPSHR, b=2000 mm, Procedimiento LP Operación	10
Figura 1-5	Matriz de criticidad, bombas de baja presión.	11
Figura 2-1	Modelo de gestión de mantenimiento, Parra y Crespo 2020	16
	17
Figura 2-2	Diagrama de bloques, AHI -DNO common network.	17
Figura 2-3	Aproximación de Taylor para PoF, equipos eléctricos.	18
Figura 2-4	Curva de la bañera de un equipo, Ing. Con. I	29
Figura 3-1	Índice de banda respectiva a la bomba, Google Colab.....	43
Figura 3-2	Relmant Risk, TO hasta fallar para bombas criogénicas.....	45

Gráficos

Gráfico 2-1	Curva PoF-HI, DNO.	18
Gráfico 3-1	Vida estimada en relación con un índice de salud.	39
Gráfico 3-2	Índice modificado v/s Índice inicial.	42
Gráfico 3-3	R(t) Base vs R(t) Ajustada.	46
Gráfico 3-4	HI vs HIM, LP101A.	48
	49
Gráfico 3-5	HI vs HIM LP101B	49
Gráfico 3-6	HIM LP A y B, reinicio de indicadores.	50



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA



SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

AHI

Asset Health Index (Índice de Salud de Activos). Herramienta cuantitativa para evaluar el estado y la condición de un activo industrial.

API

American Petroleum Institute. Organización que establece estándares para la industria petrolera.

CAPEX

Capital Expenditure (Gastos de capital). Inversiones en activos fijos o infraestructura.

DCS

Distributed Control System (Sistema de Control Distribuido). Sistema automatizado para controlar procesos industriales.

DNO Common Network

Metodología estándar utilizada para evaluar el estado de salud y riesgo de activos en redes de distribución.

FMECA

Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad). Técnica para identificar modos de falla y su impacto.

GNL

Gas Natural Licuado. Gas natural en estado líquido para facilitar su transporte y almacenamiento.

HI

Health Index (Índice de Salud). Valor numérico que representa la condición actual de un activo.

HIM

Health Index Modified (Índice de Salud Modificado). Índice de salud ajustado por factores específicos de condición y operación.

ISO 55000

Norma internacional para la gestión de activos.

MTTF

Mean Time To Failure (Tiempo Medio Entre Fallas). Indicador de confiabilidad que estima el tiempo promedio que un equipo opera sin fallas.

MTTR

Mean Time To Repair (Tiempo Medio de Reparación). Tiempo promedio para reparar un activo después de una falla.

NPSH

Net Positive Suction Head (Altura Neta Positiva de Succión). Parámetro hidráulico que indica la presión necesaria para evitar cavitación en bombas.

PAS 55

Publicly Available Specification 55. Especificación para la gestión óptima de activos físicos, predecesora de ISO 55000.



PoF

Probability of Failure (Probabilidad de Falla). Estimación de la probabilidad de que un activo falle en un periodo determinado.

RAM

Reliability, Availability, Maintainability (Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad). Parámetros claves para la gestión de activos.

RPN

Risk Priority Number (Número de Prioridad de Riesgo). Resultado del análisis FMECA que determina la criticidad de fallas.

SLC 51

Standard License Condition 51. Condición de licencia que regula la evaluación del estado de salud en redes eléctricas.

TRIP

Evento que causa la parada automática de un equipo o proceso para protegerlo.

Weibull (Distribución)

Función estadística usada para modelar tiempos hasta la falla de activos.

β (Beta)

Parámetro de forma en la distribución Weibull que indica el tipo de régimen de falla.

α (Alfa)

Parámetro de escala en la distribución Weibull que indica la vida característica del activo.

m³/h

Metros cúbicos por hora. Unidad de caudal volumétrico.

bar

Unidad de presión.

°C

Grados Celsius, unidad de temperatura.

kW

Kilovatios, unidad de potencia.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

INTRODUCCIÓN

En los inicios del siglo XX, surge la necesidad de monitorear la salud de los activos físicos debido a un alto crecimiento de las industrias, cuando las empresas se empezaron a dar cuenta de una alta dependencia de sus activos para sus actividades de producción y competitividad en el mercado. En la medida que las industrias aumentaron su complejidad y cartera de activos, se volvieron más costosos de operar y mantener ya que en ese entonces, las empresas respondían principalmente de manera reactiva a las fallas. En respuesta, surgió una gestión de activos como una disciplina inherente de toda organización que busca optimizar la eficiencia, disponibilidad y ciclo de vida de activos, así minimizando los costos asociados al mantenimiento, operación, de seguridad y ambiental.

Con el avance de la disciplina de la gestión de activos, surgieron herramientas específicas para evaluar la condición de los mismos, como el Índice de Salud de Activos (AHI) que fue inicialmente propuesta como una herramienta para cuantificar y monitorear el estado físico de salud de los activos; concepto que fue formalizado a inicios de los años 2000 en la norma PAS 55 (supervisada por John Woodhouse) que proporcionó un marco estructural para su implementación para su uso en la gestión de activos, y actualmente adoptada en la norma ISO 55000. Esta metodología permitiría a las empresas dar un enfoque más estructurado y predictivo que permitiera prevenir las fallas, adoptando un modelo de mantenimiento más proactivo con respecto al control de sus activos críticos. El AHI (Asset Health Index) integra datos históricos recopilados del mantenimiento, condiciones operativas de los activos para tomar decisiones acertadas e informadas en cuanto a un eventual reemplazo, mantenimiento o repotenciación.

La ISO 55000 ejerce como norma base para el desarrollo de esta metodología, destacando la gestión integral del ciclo de vida de los activos. La norma enfatiza la importancia de decisiones informadas basadas en datos y promueve la optimización de recursos, lo que no solo mejora el rendimiento financiero, sino que también gestiona los riesgos de manera eficiente. Como mención, en la actualidad, herramientas como el AHI se integran cada vez más con tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) y el análisis de big data permitiendo un monitoreo en tiempo real y una mayor capacidad predictiva en la gestión de activos que resulta interesante para un camino hacia la transformación digital de los procesos productivos.



1. OBJETIVO GENERAL

Implementar un Índice de Salud de Activos (AHI) para un sistema de bombas criogénicas de baja presión, en base a su condición operativa y de mantenimiento con la finalidad de validar su relación con la confiabilidad del equipo permitiendo estimaciones fundamentadas del riesgo de fallas.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Desarrollar un sistema estructurado para la recopilación de datos históricos de mantenimiento y operación de una bomba criogénica de baja presión, asegurando la calidad y relevancia de la información para el cálculo del AHI.
- ii. Aplicar un procedimiento de implementación del índice de salud de activos, basado en la norma de la DNO Common Network, para la evaluación de deterioro del activo a partir de los datos recopilados.
- iii. Validar técnico y económicamente el AHI mediante la comparación del índice calculado para la bomba estudiada con el de bombas similares, correlacionando el AHI con indicadores de confiabilidad y fallas para evaluar su consistencia y capacidad predictiva.



CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

En los años 2000 y 2004 hubo una crisis interna en Argentina, la cual reducía drásticamente la exportación de gas al país nacional. Esto llevó a Chile a buscar diversas formas de mantener un equilibrio energético y una de las soluciones fue la construcción de la primera planta (Figura 1-1) de Almacenamiento, Distribución y Regasificación de Suramérica. En el año 2009 comienza sus operaciones permitiéndole importar gas natural (GN) a la zona central por un gasoducto de 123 km de largo y distribuir gas natural licuado (GNL) mediante camiones cisterna a distintas partes del país. Hoy en día, el panorama ha cambiado, ya que la planta comenzará a recargar buques de GNL para su exportación, esto le aporta mayor protagonismo en el negocio energético. Por lo tanto, la planta debe tener la mayor disponibilidad posible de sus activos y minimizar considerablemente sus costos de operación y mantenimiento.



Figura 1-1 Planta GNL (Fuente: Google)

En la figura 1-2 La planta GNL Quintero, actualmente es propiedad en un 80% del consorcio EIG – FLUXYS y 20% de ENAP. Esta infraestructura es clave en la descarbonización de Chile con un sistema que reconcilia el crecimiento económico y adopta energías renovables. La terminal posee el 75% de la capacidad de regasificación de GNL al país, además, cuenta con 3 tanques de almacenamiento de 334.000 m³ de GNL, 2500 m³ por día de carga de camiones cisterna y una regasificación diaria de 15 millones de m³ e importados por un gasoducto de 123 km de largo a 72 bar de presión.

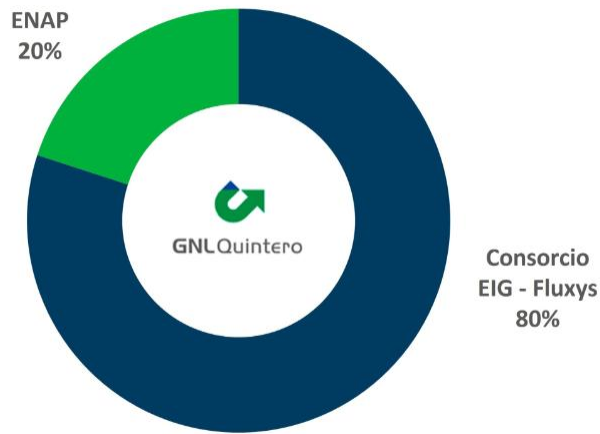


Figura 1-2 Accionistas GNL (Fuente: GNL.com)

1.1.1. Misión

“Operar y desarrollar nuestro Terminal de GNL en Quintero para entregar un suministro confiable de gas natural y GNL a la zona central de Chile mediante una operación sostenible, segura y eficiente, agregando valor a nuestros accionistas, clientes, comunidades vecinas y medio ambiente, a través de un equipo de personas capacitadas, motivadas y comprometidas.”

1.1.2. Visión

“Ser reconocidos a nivel nacional y en la industria global del GNL por nuestra operación sostenible y servicio de excelencia, la calidad y compromiso de nuestros empleados, nuestros altos estándares éticos y de seguridad, la confiabilidad y eficiencia de nuestras operaciones, la innovación, y responsabilidad económica, social y medioambiental.”

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las actividades del terminal de GNL Quintero son una parte de la cadena de valor de GNL, dentro de sus actividades está el transporte, el almacenamiento, la regasificación y la exportación hacia un consumidor final. A continuación, se detallará brevemente cada proceso.

1.2.1 Descarga

El GNL llega en buques metaneros con capacidad de hasta 265.000 m³ a descargarlo al terminal, el cual cuenta con 5 brazos de descarga – 3 para la descarga, 1 híbrido y 1 para retorno de vapores -. Estos brazos que se acoplan al buque tienen una presión de operación entre 2 y 6 bar a una temperatura de -160°C y con flujo de operación entre 3000 m³/h y 5500 m³/h. El brazo de vapor tiene como función compensar las presiones dentro del buque a una presión de 205 mbar a una temperatura de -115°C.

El vapor que retorna hacia el buque proviene desde los tanques de almacenamiento y es desplazada por el compresor UNLOADING el cual succiona el BOG a 205 mbar y lo descarga a 8 bar.

1.2.2. Almacenamiento.

El GNL es almacenado en 3 tanques criogénicos con capacidades de 151.000 m³ y 10.000 m³ los cuales tienen como parámetro de diseño presiones máximas y mínimas de 290 mbar y 5 mbar respectivamente. Para el llenado del estanque se evalúan las densidades de GNL estanque y GNL buque para determinar si la descarga es por tope o por fondo para evitar la estratificación (“roll over”).

Los tanques de almacenamiento poseen bombas de baja presión que descargan el GNL hacia el proceso de regasificación de planta, trabajan a una operación de 13 bar.

1.2.3. Regasificación.

Dentro del proceso es imprescindible que las líneas de BOG se mantengan sin partículas de GNL para que los compresores de BOG no sean dañados internamente, por lo que existen 3 Knock Out Drums que tienen como función separar cualquier gota presente en el BOG para que los compresores UNLOADING, PIPELINE, HOLDING A y B puedan trabajar este gas.

El compresor HOLDING A y B son dos equipos recíprocos de doble efecto que trabajan a una presión de 8 bar que aporta BOG hacia el recondensador, compresor pipeline y barco. El compresor de gasoducto PIPELINE es un equipo centrífugo de dos etapas (alta y baja presión) el cual tiene como función comprimir el BOG extra que se genera en el recondensador y de los compresores de retención evitando que este sea

expulsado por la FLARE y enviándolo a exportación por el gasoducto a 65 bar. El recondensador tiene como función volver a un estado líquido el BOG existente inyectando GNL subenfriado, es importante que este equipo no sobrepase un 58% de GNL pues esto botaría el equipo.

Existen 5 bombas de alta presión que son equipos centrífugos de desplazamiento negativo de 11 etapas y tienen como función succionar desde la descarga de las bombas LP y el recondensador, para descargar hacia los vaporizadores ORV (open rack vaporiser) A/B/C y el SCV (sumerged combustión vaporiser). Descargan a una presión de 70 bar con un caudal de 300 m³/h. El sistema de transferencia de calor por convección de los ORV's tiene como función regasificar el GNL para su exportación, utilizando el agua de mar para calentar el GNL por medio de tuberías y retornando esta agua hacia el océano. La Flare recoge los vapores de hidrocarburos que se forman en exceso para eliminarlos mediante la combustión que se encuentra a una altura segura. Estos actúan cuando hay una sobrepresión en los estanques de almacenamiento (260 mar).

1.3 SISTEMA DE LLENADO Y DESCARGA DE ESTANQUES

En planta existen 3 tanques de almacenamiento; TK-301, TK-201 y TK-101 con capacidades de 10.000 m³ y 151.000 m³ respectivamente. Estos tanques están recubiertos con acero al carbono con 9% níquel, de muro de concreto y base de amortiguadores antisísmicos. Los estanques tienen una pérdida calórica (vaporización de GNL) de un 0,05% lo que suscita a un aumento de la presión la cual es regulada por la capacidad de succión de los compresores BOG cuando se tiene una descarga de GNL. Cabe señalar que los estanques también reciben BOG de otros equipos con el fin de despresurizar los mismos como por ej. los ORV'S, bombas HP. La descarga desde el buque trabaja a una presión de 2 bar para el llenado del estanque.

Los estanques cuentan con varios instrumentos de control que otorgan una mejor visibilidad y trazabilidad sobre las condiciones operativas de sus sistemas de almacenamiento. Las válvulas PRV y VRV son uno de estos, como medida de seguridad ante una sobrepresión por encima de los 290 mbar se activan las PRV liberándolo a la atmósfera. Por otro lado, si existe una presión negativa <-0,2 bar generando un vacío en el estanque se activan las VRV y abren a la atmósfera, teniendo en cuenta que esto generaría una atmósfera peligrosa.

Cada estanque cuenta con bombas de baja presión para la descarga del GNL contenido hacia el área de procesos. El TK-301 al ser de menor capacidad de

almacenamiento sólo cuenta con 2 bombas LP. Cada bomba posee control y protección de flujo, monitoreo de vibraciones y sello de nitrógeno para descartar presencia de hidrocarburos.

1.4 SISTEMA DE CONTROL DE LOS ESTANQUES DE ALMACENAMIENTO

El sistema de almacenamiento de GNL utiliza el control de presión del estanque como esquema principal. Se monitorean el nivel, temperatura y densidad del GNL para prevenir el “roll over”. En operaciones de Gas Temprano, el control de nivel del estanque se usa para ajustar los controladores de caudal de descarga y mantener el equilibrio y nivel constante del estanque. El control de presión del estanque de almacenamiento de GNL considera la presión de diseño, las válvulas PRV y VRV, la minimización del BOG durante la descarga y la variación de la presión atmosférica. Para evitar TRIPS ESD de alta presión debido a variaciones atmosféricas, los transmisores de presión deben tener dispositivos de presión normal, ya que el diseño de los estanques se basa en este criterio. En la tabla 1-1 se expresan los valores de presiones y el efecto-consecuencia en los sistemas de control.

TK ALMACENAMIENTO

Presion (mbarg)	Descripción
290	P de diseño del estanque/Seteo PRV'S
280	TRIP por PAHH
270	P de válvula de alivio hacia FLARE
265	Alarma de alta presión del estanque PAH
260	P máx durante descarga de buque
180	P operación mínima contención de GNL
100	P operación normal de GAS TEMPRANO en retención.
60	Alarma de baja presión en estanque PAL
50	Trips de baja presión en compresores BOG, PALL
30	Abre PCV quebradora de vacío de gas exportación PAL
15	Trips de baja presión en compresores BOG y LP'S, PALL
-2.2	Seteo activación VRV's
-5	Rompe vacío-flujo pleno

Tabla 1-1. Presiones de alarma, elaboración propia.

El control de presión del estanque de GNL incluye un controlador común para los compresores BOG y controladores para el gas rompe vacío y la antorcha. En baja presión, se agrega gas natural al colector de BOG, y en alta presión, el exceso de gas se libera a la antorcha. Las medidas de presión se verifican en un bloque lógico, enviando el mayor valor al controlador de capacidad del compresor BOG. Los valores normales de operación

varían según el estado del gas. La presión relativa y absoluta de cada estanque se muestran en un display para el operador.

1.5 BOMBAS DE BAJA PRESIÓN (LP)

Las bombas de baja presión (figura 1-3) tienen la función de enviar el GNL desde los estanques hacia las bombas de alta presión, de similares características. Estas bombas de baja presión están sumergidas en una columna de pozo que para su funcionamiento óptimo debe cumplir con los siguientes requerimientos.

- i. Se debe suministrar una corriente, voltaje y frecuencia al motor a niveles apropiados.
- ii. Debe existir un nivel de líquido en la entrada de la boca de la bomba sin sustancias extrañas ni presencia de hidrocarburos.

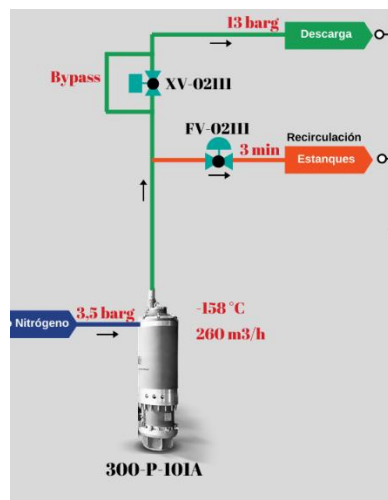


Figura 1-3 Flujo de descarga de bomba LP, proceso del GNL

La siguiente tabla 1-2 es confeccionada con fines de recopilar los datos más importantes dentro de un extenso manual de operación para las bombas de baja presión.

Bomba	
Caudal Nom.	356 m ³ /h
Presión Succión	0.38 barg
Presión Descarga	12.79 barg
Temperatura Op.	-159.3 C°
Densidad Relativa	422 kg/m ³
RPM	3000 rev/min
Potencia Nom.	197 kW

Tabla 1-2. Datos de la bomba, operaciones.

El motor eléctrico que genera esta fuerza mecánica debe cumplir los siguientes requerimientos (tabla 1-3) de operación para que existan un trabajo óptimo, la siguiente tabla lo expresa.

Motor	
Potencia	6.6 kW
Corriente	28.1 A

Tabla 1-3. Datos operativos del motor eléctrico.

Se recomienda por el vendedor que se ejecute un mantenimiento preventivo a la bomba cada 8000 horas de funcionamiento, en donde se solicita una revisión de los componentes internos de la bomba, tales como impulsor, eje, difusor, cojinetes de bolas, acelerómetros de vibración. Sin embargo, este intervalo se extendió a las 20000 horas.

Para la puesta en servicio de estas bombas sumergibles primero deben estar purgadas con nitrógeno para descartar cualquier presencia de hidrocarburos en la bomba y en el conexionado eléctrico. Además, se debe enfriar con GNL como mínimo por 3 horas para estabilizar la temperatura en el estator y rotor, y el nivel de líquido en la columna debe estar por sobre NPSHR + 1m (figura 1-4) de manera que no haya una operación en seco. Se debe comprobar la resistencia del aislamiento del motor que no debe ser inferior a 40 megohmios y que la corriente de partida no dure por más de 3 segundos.

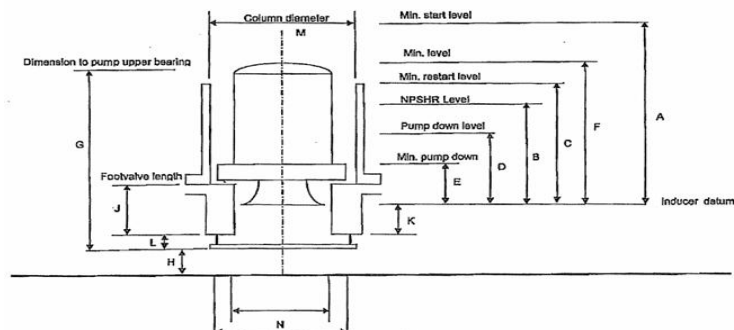


Figura 1-4 Nivel NPSHR, b=2000 mm, Procedimiento LP Operación

1.6 JUSTIFICACIÓN DE ELECCIÓN DE ACTIVO

Como se mencionó anteriormente, la bomba criogénica de baja presión constituye un eslabón esencial en el sistema de regasificación de GNL, ya que es la responsable de trasladar el gas licuado desde los estanques de almacenamiento hacia la fase de alta presión y posterior regasificación. Su desempeño incide directamente en la continuidad operativa de la planta y en la seguridad del proceso. Un fallo en la bomba no solo interrumpe el flujo del GNL, sino que generará un problema en cascada de efectos negativos en el sistema de regasificación. Dado que estas interrupciones repercuten directamente en la producción y en la seguridad operativa, el activo se posiciona con un nivel alto de criticidad (figura 1-5). La confiabilidad de este componente es, por tanto, un factor crucial para la toma de decisiones en la gestión de los activos.

Respecto a las condiciones operacionales de la bomba, está sometida a desafíos técnicos significativos. La bomba debe soportar variaciones térmicas severas y trabajar en ambientes donde las desviaciones de parámetros establecidos (flujo, presión, temperatura, nivel) pueden acelerar el deterioro mecánico. Estas exigencias hacen que la **evaluación de su estado de salud** sea prioritaria para mantener su rendimiento óptimo y evitar fallas inevitables.

La implementación de un Asset Health Index para este activo permitirá monitorear continuamente y “predecir” su comportamiento a lo largo de su vida útil, esto mejorando la eficiencia en la planificación de mantenimientos preventivos y correctivos, además de optimizar la asignación de recursos y minimizar costos operativos derivados de potenciales fallas.



Figura 1-5 Matriz de criticidad, bombas de baja presión.

Según un reporte hecho por la DNV en 2014 (Anexo) para el terminal de regasificación de GNL se identifica que, para cada unidad, la ocurrencia anual de reparaciones menores es de 0.33 eventos/año y de “overhaul” o reparaciones mayores 0.033 eventos/año. Por su parte, un plan de mantenimiento preventivo tradicional tiene un

coste de 7200 USD/año, lo cual representa un incremento del 55% al coste puro de fallos respecto a su frecuencia (tabla 1-4) Sin embargo, esta comparación económica oculta dos efectos críticos: (1) Pérdida de redundancia y paradas no programadas: En el rack de bombas de baja presión, cuatro fallas simultáneas comprometerían el envío de GNL, con impacto operativo y penalizaciones cuyo valor supera ampliamente los 30000 USD de cada “overhaul”. (2) Costes de oportunidad por interrupción de suministro, un cese de una hora de operación en la V región (20833 m³/h consumidos) equivale a aproximadamente **25350 USD/h** de ingresos no facturados, según informes de GasValpo sobre el consumo de gas natural (2024), sin considerar costes de arranque/parada.

Tipo de evento	Frecuencia	Coste Unitario (USD)
Reparación menor	0.33	\$11,000
Reparación Mayor/ Overhaul	0.033	\$30,000
Matenimiento Preventivo		\$7,200

Tabla 1-4. Frecuencia de fallas y costes, Informe DNV (2014).

Se selecciona como caso de estudio la bomba LP101C por su criticidad operativa en el proceso de regasificación de GNL. Bajo una recopilación estructurada de datos, se puede decir que el equipo opera bajo condiciones térmicas severas que alcanzan los -160°C, ha alcanzado caudales superiores a 350 m³/h y presiones de descarga sobre 11 bar en los registros del DCS entre 2018 y 2024. Adicionalmente, presenta una alta frecuencia de partidas- con más de 25 ciclos de partida por trimestre en algunos periodos-, con ccilos de hasta 169 en el segundo trimestre de 2024 (tabla 1-5) y ha registrado recurrentes eventos de vibraciones por encima del umbral técnico, no se puede acelerar un diagnóstico con los métodos tradicionales. Estos factores, combinados con las variaciones observadas en parámetros como el consumo eléctrico (kW), niveles de tanque y condiciones de presión diferencial dan un escenario más realista donde la degradación de los componentes no es lineal y que no se puede abordar con los modelos de confiabilidad tradicionales. La existencia de estos datos completos y digitalizados de operación y mantenimiento (tabla 1-5) hace que la elección de la bomba pueda ser un caso de estudio y un candidato ideal para la implementación de un índice de salud y evaluar su correlación técnica con el activo.



Etiquetas de fila	Fuera servicio	Total
01-01-2023 - 02-04-2023	27	27
03-04-2023 - 03-07-2023	28	28
04-07-2023 - 03-10-2023	24	24
04-10-2023 - 03-01-2024	50	50
04-01-2024 - 05-04-2024	25	25
06-04-2024 - 06-07-2024	169	169
07-07-2024 - 06-10-2024	16	16
07-10-2024 - 31-12-2024	19	19
Total	358	358

Tabla 1-5. Extracto activo fuera de servicio.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO, “ASSET HEALTH INDEX” UNA METODOLOGÍA PARA SU IMPLEMENTACIÓN.

Este capítulo desarrolla el marco teórico y la justificación técnica para la implementación del índice de salud de activos en contextos industriales de alta criticidad de operación, tomando como base la metodología estructurada de la DNO Common Network, con énfasis en su relación con indicadores de confiabilidad y toma de decisiones basadas en riesgo. Dicha metodología permite a la organización realizar un monitoreo estructurado de sus activos, asegurando que las decisiones de operación y mantenimiento estén alineadas con los objetivos organizacionales.

La metodología se enfoca en medir parámetros específicos de los activos para definir un índice de salud en una escala determinada que, por lo general, va desde un estado inicial (0.5) a un estado de deterioro por condición (10). Para llegar a este índice se deben evaluar varios factores tales como, condiciones físicas, edad del activo, históricos de mantenimiento y operación.

El índice de salud proporciona una calificación del activo, diseñada de alguna manera para caracterizar el estado de condición que permite a la organización conocer la capacidad de que el activo cumpla con su rol establecido (Abichou, Et.al 2012). El AHI es una herramienta poderosa en la gestión de activos que al aplicarlo de una manera eficiente ayuda a tomar decisiones en beneficio de los costos financieros en el caso de que sea más factible reemplazar antes que reparar; permite justificar capitales de inversión (CAPEX) en infraestructura, mejorando el ciclo de gestión de activos.

La metodología de índices de salud se encuentra plenamente alineada con los principios y recomendaciones del Modelo Integral de Gestión del Mantenimiento (MGM), así como con los estándares internacionales de gestión de activos físicos (ISO 55000) y las propuestas de la Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad (SMRP/CMRP). Como señalan Parra y Crespo (2020), la gestión moderna del mantenimiento debe concebirse como un proceso dinámico, secuencial y de mejora continua, fundamentado en la recolección, análisis y utilización de datos en tiempo real para la toma de decisiones estratégicas y operativas. En este contexto, el MGM enfatiza la importancia de contar con análisis estocásticos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (RAM), la priorización de activos mediante matrices de criticidad, la integración de sistemas de monitoreo de condición y la flexibilidad en la planificación basada en riesgos y desempeños.

La aplicación de la metodología de índices de salud aporta valor en varios puntos clave: (1) permite la cuantificación objetiva de la salud y el riesgo de los activos, superando las limitaciones de los modelos tradicionales; (2) facilita la priorización dinámica de intervenciones, alineada con el ciclo de vida del activo y los objetivos de la organización y (3) favorece la integración de la gestión del mantenimiento con la estrategia global de gestión de activos, en línea con las recomendaciones de la ISO 55000.

El MGM (Parra. C, Crespo A. 2020) explica, desde un enfoque estructurado, las fases del mantenimiento y establece las acciones concretas necesarias para gestionar los activos con eficiencia, eficacia y mejora continua. En particular, la figura 2-1 destaca que la fase 7 del modelo incluye los instrumentos para el control de estado, como el AHI. Este índice proporciona una evaluación del estado general de los activos, permitiendo identificar en qué etapa de su vida útil se encuentran, es información crucial para tomar decisiones informadas respecto al mantenimiento, la renovación o el reemplazo de los activos.

El procedimiento a continuación se basa en el marco común de definiciones y principios de cálculo adoptado por los operadores de redes de distribución en Gran Bretaña con el objetivo principal de proporcionar una forma estandarizada de evaluar el estado de salud de los activos. Esta metodología se rige por la Standard License Condition 51 (SLC 51) de la licencia de distribución de electricidad en GB y la entidad que aprueba esta metodología es la oficina de mercados de gas y electricidad (OFGEM) que es la responsable de regular los mercados promoviendo la sostenibilidad y eficiencia energética.



Figura 2-1 Modelo de gestión del manenimiento, Parra y Crespo 2020

2.1 FUNDAMENTOS DE APLICACIÓN

La implementación del cálculo de un índice de salud debe justificarse bajo un enfoque estandarizado que asegure que las evaluaciones sean transparentes, consistentes y sobre todo útiles para los análisis internos en el mantenimiento. La metodología establece las entradas, cálculos y salidas que posteriormente se comunicarán a través de matrices de riesgo que muestren la salud y criticidad de los activos desde una unidad hasta un conjunto de activos. Este procedimiento es común para una mayoría de activos individuales, esto es una evaluación de la actual salud basada en condiciones observadas y medibles en un rango de tiempo determinado, y un estado de salud futuro utilizando supuestos sobre un posible escenario de mayor desgaste del activo, se debe tener en cuenta la edad y utilizar una escala continua de puntuación de salud.

Es importante destacar que existe una relación inversa y calibrada entre la puntuación del índice de salud de un activo y su probabilidad de falla, de acuerdo con la metodología a continuación. En la figura 2-2 se ilustra un diagrama de bloques general para el cálculo de un índice de salud.

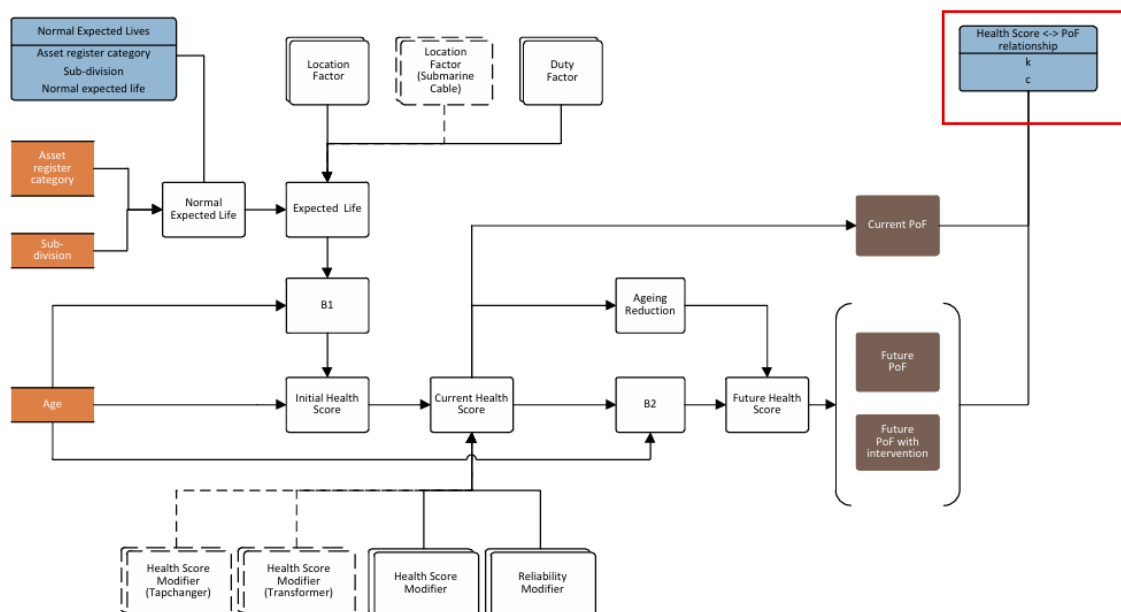


Figura 2-2 Diagrama de bloques, AHI -DNO common network.

En la metodología propuesta por la DNO, la relación entre Health Score (H) y Probability of Failure (PoF) se define mediante una aproximación de Taylor (figura 2-3), donde los

parámetros K (escala) y C (forma) son constantes que configuran la curvatura de la función PoF-HI. Los valores genéricos de PoF propuestos por la DNO (p.36-38) aseguran que un activo con Health Score Máximo (10 a 15) presentan una probabilidad de falla diez veces mayor que uno nuevo, y se recopilan en la tabla 21 del Apéndice B. Sin embargo, dado que los activos industriales criogénicos Oil & Gas difieren en su régimen de operación y modos de falla de la red de distribución eléctrica, es necesario calibrar K y C sobre **datos históricos específicos** del activo en estudio.

$$PoF = K \times \left[1 + (C \times H) + \frac{(C + H)^2}{2!} + \frac{(C + H)^3}{3!} \right]$$

Figura 2-3 Aproximación de Taylor para PoF, equipos eléctricos.

Esta relación se describe bajo una curva genérica y es una de las más utilizadas en la gestión del mantenimiento. En los valores más bajos del índice se muestra una línea constante de PoF y a medida que aumenta el puntaje también el PoF, esto debido a que una mayor degradación da lugar a una mayor probabilidad de falla. Para construir esta curva se necesitan de dos parámetros comunes, K y C, donde C define la forma de la curva y K define la escala del PoF a una tasa de fallas en un rango estudiado. Esto parece ser una distribución probabilística similar a la Distribución de Weibull que, en el área de la confiabilidad, estima el tiempo de operación hasta la falla de los componentes mecánicos de un activo, donde Beta es su forma y Alfa su escala.

En el gráfico 2-1 se ilustran líneas límites de puntaje de salud donde cada banda tiene una relación de incremento con el PoF. El valor de escala de cada activo (K) deriva de tres consideraciones; en un número de fallas funcionales observadas en un año; distribución del índice de salud de la población de activos de un mismo conjunto y el volumen de activos en un conjunto.

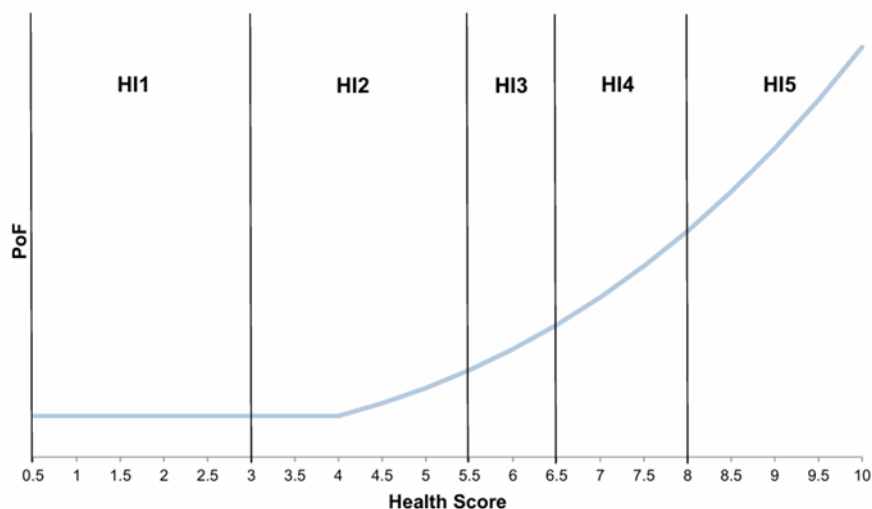


Gráfico 2-1 Curva PoF-HI, DNO.

En el gráfico se expresan rangos de salud de activos que van desde H1 – H5, es decir que con el transcurrir de los años y a las condiciones a las que se ha expuesto el activo esta tenderá a deteriorarse hasta llegar al fin de su vida útil. HI 5 representa el rango de máximo desgaste y la línea de valor 5.5 representa el valor de vida normal esperada del equipo.

Para efectos de ilustración, la DNO Common Network (p.29) ha establecido valores referenciales a los puntajes de salud de los activos. El puntaje de salud representa el estado actual de un activo mediante una escala continua entre 0.5 y 10. Sin embargo se establece como un valor máximo de 15 debido al puntaje futuro de salud del activo para una modelización del deterioro del activo, el cual se deriva de un puntaje de salud inicial donde su valor máximo observable es 10 (tabla 2-1).

Health Index Band	Health Index Banding Criteria	
	Lower Limit of Health Score	Upper Limit of Health Score
H11	≥ 0.5	< 3
H12	≥ 3	< 5.5
H13	≥ 5.5	< 6.5
H14	≥ 6.5	< 8
H15	≥ 8	≤ 15

Tabla 2-1. Rangos de banda HI, DNO.

El AHI se integra naturalmente con el cálculo del riesgo al acoplar la probabilidad de falla (PoF) de cada activo con sus consecuencias de falla (CoF). En la metodología DNO, el riesgo anual por condición de un activo se define explícitamente como el producto PoF x CoF, calculados a nivel de activo individual. Esta lógica se resume en el diagrama de proceso (figura 2-2) donde el Health Score (puntaje de salud) se transforma en PoF, y la CoF se desagrega en consecuencias financieras, de seguridad, ambiental y de desempeño de nivel antes de combinarse en una matriz de riesgo (DNO, p28, sección 5.1-5.2).

2.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL AHI

Este procedimiento se basa en el estándar propuesto por la DNO Common Network Asset Indices Methodology versión 2.1, el cual ha sido ampliamente adoptado en las industrias de petróleo y gas.

La implementación está dada por 5 pasos consecutivos que, partiendo desde una edad normal estimada por el fabricante, a éste se le aplican los factores a evaluar tales como condiciones físicas, emplazamiento y condiciones operativas.

Para los pasos preliminares se deben identificar que los siguientes puntos se cumplan.

- 1- El activo debe estar completamente identificado, es decir, vida actual, vida esperada, localización física e información facilitada por el fabricante referente a mantenimiento y operación.
- 2- Datos de operación dentro de un rango determinado de tiempo, indicando periodos de estrés, de arranques y paradas.
- 3- Condiciones actuales del equipo, como los resultados de variables físicas como temperatura, vibraciones, etc.

A continuación, se detallarán los pasos a seguir para la implementación de la metodología AHI para el caso estudio.

Paso 1: Vida normal estimada

En este paso se identificará el activo junto a su ubicación geográfica. Para calcular la vida estimada se necesitarán los siguientes datos.

- Categoría del equipo.
- Subcategoría del equipo.
- Vida estimada.

Estos datos están definidos por la estructura normativa de la ISO 14224 en el intercambio de datos de activos industriales y de confiabilidad para industrias petroquímicas y gas natural. La vida normal estimada estará dada por el fabricante junto al análisis del activo dado por un departamento técnico de la organización (DNO, p.36. Sección 6.1.3).

Paso 2: Vida estimada con factores de localización y carga

En este paso, la vida estimada se deriva de la vida normal con factores de degradación: Factor de localización que representa los efectos del entorno en el que se encuentra el activo (figura 2.4) y el factor de carga que representa cualquier envejecimiento adicional debido a la forma en que está siendo utilizado el activo (DNO, p46, p51).

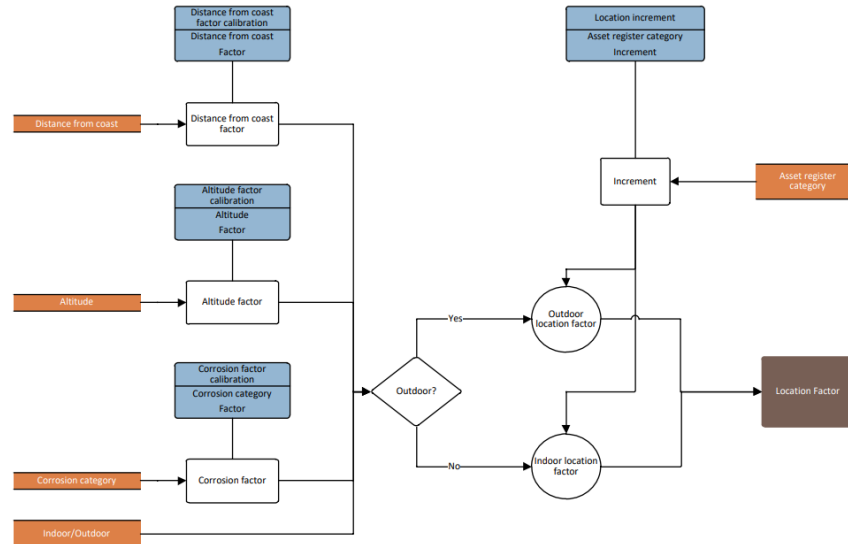


Figura 2-4 Interacción de factores de localización.

$$Vida\ Estimada = \frac{Vida\ normal\ estimada}{Factor\ carga\ x\ Factor\ Localización} \quad (2-1)$$

Para los factores de degradación mencionado se confecciona una tabla. Para el factor de localización se evalúa si se encuentra dentro o fuera de un habitáculo que proteja de los agentes externos del entorno. En el caso de que el activo se encuentre en el exterior se puede subdividir en varios factores para completar la siguiente fórmula.

$$Fe = Máx (Fdc, Fsei, Fat, Fps, Ft) \quad (2-2)$$

Donde,

- Fe = Factor de emplazamiento combinado
- Fdc = Facto distancia a la costa
- Fsei = Factor sector interior o exterior
- Fat = Factor atmósfera corrosiva
- Fps = Factor partículas en suspensión
- Ft = Factor temperatura anual promedio

Para el caso de estudio, bombas de baja presión para descarga de gas licuado natural de tanques de almacenamiento, se confeccionaron tablas con los factores

mencionados para obtener la vida estimada respecto a factores de carga y localización. La tabla 2-2 corresponde a la distancia desde el activo hasta la costa, esto sugiere que mientras más cercano a la costa más propenso estará el activo a condiciones corrosivas.

Factor de localización	
Distancia a la costa	Factor (Fdc)
0-1 km	1,2
1-5 km	1,15
5-10 km	1,1
10-20 km	1,05
>20km	1

Tabla 2-2. Distancia a la costa, Elaboración propia.

La segunda tabla 2-3 corresponde a la altura a nivel del mar, esto sugiere que mientras mayor altura respecto al mar habrá una presión distinta relativa, esto condiciona las condiciones de operación del activo.

Factor de localización	
Altura nivel del mar	Factor (Fam)
0-500 m	1,0
500-1000 m	1,1
1000-1500 m	1,2
1500-2000 m	1,3

Tabla 2-3. Altura al nivel del mar, Elaboración propia.

La tercera tabla 2-4 corresponde a la temperatura anual promedio del sector en donde se encuentra el activo.

Factor de localización	
Temperatura anual prom.	Factor (Ft)
0-10 °C	1
10-20 °C	1,05
20-30 °C	1,1
>30°C	1,15

Tabla 2-4. Temperatura anual promedio, Elaboración propia.

La cuarta tabla 2-5 corresponde a la exposición del activo, si es interno a un habitáculo o externo a la atmósfera.

Factor de localización	
Exposición	Factor (Fexp)
exterior	1,2
interior	1,0

Tabla 2-5. Exposición a la atmósfera, Elaboración propia.

La última tabla 2-6 corresponde al tipo de partículas que el equipo está expuesto, pueden ser en suspensión o corrosivas.

Factor de localización		
Partículas	Aplica	No aplica
En suspensión	1,1	1,0
Corrosivas	1,2	1,0

Tabla 2-6. Partículas en la atmósfera, Elaboración propia.

Cuando el activo se encuentra en el interior de un habitáculo en donde se le proteja de las adversidades del entorno éste tendrá un valor de 1.

El factor de carga es inherente del factor de localización, este factor mide la solicitud de carga al activo dependiendo de su ubicación técnica respecto a su carga máxima admisible. Estos valores están dados por puestas en marcha y datos del fabricante.

$$F_c = \frac{\text{Carga en condiciones normales}}{\text{Carga máxima admisible}} \quad (2-3)$$

Analizando la ecuación la carga en condiciones normales será menor a la carga máxima admisible, por lo tanto, $F_c < 1$. La vida estimada se verá afectada por la ubicación del activo y el rendimiento operativo, un valor del cociente entre estos factores mayor a 1, indicará que el valor de vida estimada disminuirá y si es un valor menor a 1 ocurrirá lo inverso.

Paso 3: Cálculo del envejecimiento

El envejecimiento de un activo se comporta como una variable exponencial respecto a la edad de este, la tasa de envejecimiento (ϕ) es un parámetro que modela matemáticamente el comportamiento del activo a lo largo de su vida útil la cual se verá afectada por factores de deterioro (corrosión, falla de aislaciones).

La tasa de envejecimiento (ϕ) va a estar dada por el logaritmo natural del cociente entre la salud del activo nuevo y la salud del activo cuando alcanza la vida estimada (DNO, p.36, sección 6.1.5).

$$\phi = \frac{\ln\left(\frac{HI \text{ nuevo}}{HI \text{ vida estimada}}\right)}{Vida \text{ estimada}} \quad (2-4)$$

Donde,

- HI Nuevo = 0.5, valor de activo nuevo.
- HI V.E = 5.5, valor de vida estimada del activo según fabricante.
- Vida estimada = En horas.

Dando como resultado,

$$\phi = \frac{2,4}{Vida \text{ estimada}}$$

Paso 4: Índice de salud inicial

Éste índice representa la tendencia exponencial del comportamiento del equipo sin aplicación de los modificadores de salud, confiabilidad y carga. Esta etapa proporciona un índice de salud inicial hasta una máxima de salud de activo nuevo (5.5) y que deberá ser modificado en las siguientes etapas (DNO, p.36, sección 6.1.6).

$$HIi(t) = HI \text{ nuevo} * e^{\phi * t} \quad (2-5)$$

Una vez definido el índice de salud inicial, es necesario considerar los factores externos que modifican su evolución.

Paso 5: Índice de salud modificado

Es el ajuste del índice de salud actual inicial, el cual tiene como objetivo diferenciar el comportamiento teórico del equipo respecto a la cuantificación de factores, denominados modificadores de salud, que afecten la duración de la vida del activo.

$$AHIMi = HI \text{ nuevo} * e^{\frac{\phi * t}{Mc}} * Ms * Mf \quad (2-6)$$

Donde,

- M_c = Modificador de carga
- M_s = Modificador de salud (condición)
- M_f = Modificador de confiabilidad

Para reflejar la condición real del activo, se introducen modificadores específicos que ajustan el deterioro teórico proyectado.

2.1.1 Modificador de salud (M_s)

Este modificador indica la condición actual en la que se encuentra el activo, este valor es el resultado de ciertos parámetros a considerar en inspecciones en los mantenimientos programados y operaciones que tendrán una implicancia en la salud del activo (DNO, p.52, sección 6.7).

- Un factor de puntuación de salud que multiplique a la puntuación de vida inicial.
- Un límite máximo y mínimo de puntuación de salud, que se aplique al producto del factor de puntuación de salud con la puntuación de vida inicial.

La ecuación para el modificador de salud es:

$$M_s(t) = \prod_{j=1}^{j=n} M_{s_j}(t) \quad (2-7)$$

Donde,

- $j = 1, 2, \dots, n$ índice utilizado para la cantidad de modificadores de salud
- $M_s(t)$ = Modificador de salud en tiempo

2.1.2 Modificador de carga (M_c)

En línea con Durán et.al (2020), se incorpora un modificador de carga dependiente del tiempo para reflejar variaciones reales de operación respecto del servicio esperado. El índice de salud inicial se evalúa por periodo t como la ecuación 2-6 donde M_c captura la intensidad de la carga y ciclos de arranque observados en t . A diferencia de la DNO que utiliza sólo el Factor de Carga para ajustar la vida estimada previo al índice de salud inicial. (DNO 2021, p.23-24; Durán et al. 2020, p.5 Eq. 9).

La ecuación para el modificador de carga es:

$$Mc(t) = \frac{\text{Factor de carga}}{\frac{\text{Promedio de carga (edad)}}{\text{Carga máxima admisible}}} \quad (2-8)$$

2.1.3 Modificador de confiabilidad (Mf)

La metodología contempla un *Reliability Modifier* como entrada adicional del proceso para reflejar evidencia histórica/operacional relevante a la confiabilidad (DNO, p.73, sección 6.14). Generalmente, estos parámetros son identificados por el fabricante, historiales en base a mantenimientos programados, correctivos e indicadores de los activos de una misma categoría.

$$Mf = \prod_{k=1}^{k=n} Mf_j(t) \quad (2-9)$$

Donde,

- $k = 1, 2 \dots n$ índice utilizado para cantidad de modificadores de confiabilidad.
- $Mf(t)$ = modificador de confiabilidad en una cantidad de tiempo.

La asignación de factores a los modificadores de salud y confiabilidad debe basarse en una combinación de criterios técnicos, experiencia empírica y literatura de manuales del fabricante. Se recomienda comenzar con tablas orientativas publicadas por organizaciones reconocidas (DNO, IEEE o fabricantes), ajustando estos valores a partir del análisis histórico y la realidad operacional de la planta. El factor asignado debe reflejar el impacto relativo de cada condición respecto al escenario de operación normal, procurando la máxima objetividad en la ponderación.

Para el caso de estudio se utilizarán valores de referencias a documentos de investigación “*A model for lifecycle cost calculation based on asset health index (De la fuente, A. Sola, A. Crespo, A 2019)*”.

2.3 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

El cálculo del *mean time to failure* (MTTF) se basa en modelos matemáticos probabilísticos que estiman la confiabilidad de un activo o sistema durante un período específico de evaluación $R(t)$. Entre los modelos más utilizados para variables aleatorias

continuas destacan la distribución Exponencial y la de Weibull, ésta última fue introducida por Wallodi Weibull en 1951 como una función empírica para representar datos de vida útil de componentes, pero su flexibilidad la ha consolidado como una de las distribuciones más empleadas en ingeniería industrial y mantenimiento.

La confiabilidad y mantenibilidad de un activo influyen directamente en sus costos de operación. Estos aspectos se evalúan a través de dos indicadores clave: el MTTF, que representa el tiempo promedio entre fallos, y el mean time to repair (MTTR), que mide el tiempo promedio requerido para restaurar la operatividad del activo tras una falla. Ambos indicadores son esenciales para optimizar la planificación de recursos de mantenimiento, reducir el tiempo de inactividad no programada y mejorar la eficiencia operativa.

A medida que un activo envejece, su estado se deteriora y la probabilidad de falla se incrementa. Si bien un mantenimiento mayor (overhaul) puede restaurar parcialmente a una condición “*as good as new*” esta recuperación es temporal. Este comportamiento está estrechamente relacionado con el concepto de confiabilidad, entendido como la probabilidad de que un sistema cumpla su función bajo condiciones específicas de uso durante un tiempo determinado.

El análisis de confiabilidad permite reducir la incertidumbre sobre el comportamiento de los activos mediante el análisis de indicadores clave, como el tiempo entre fallas (time to failure, TTF), una variable aleatoria que evalúa su desempeño y ayuda a predecir su vida útil operativa.

- Función de densidad, probabilidad de falla $f(x)$.

$$f(t) \tag{2-14}$$

- Función de distribución acumulada de probabilidad de falla $F(x)$.

$$F(t) = \int f(t)dt \tag{2-15}$$

- Función de distribución acumulada de probabilidad de que no falle $1-F(x)$, $R(x)$.

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{2-16}$$

- Función tasa de fallos (λ).

$$h(t) = f(t)/R(t) \tag{2-17}$$

- Función de la media, MTTF, $E(x)$.

$$E(t) \tag{2-18}$$

Los parámetros para definir el modelo son la forma (β) y la escala (α), a diferencia de los modelos tradicionales como el exponencial; la tasa de fallos no es constante, al contrario, el número de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo no permanece varía, es decir que puede crecer o decrecer en el tiempo.

- Función de densidad del modelo Weibull

$$f(t) = \frac{\beta * t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} * e^{-(\frac{t}{\alpha})^\beta} \tag{2-19}$$

- Distribución de la función

$$F(t) = 1 - e^{-(\frac{t}{\alpha})^\beta} \tag{2-20}$$

La siguiente figura 2-5 expresa la vida de un activo como la curva de una bañera, en donde la forma (β), según el valor que tenga, estima el periodo que el activo se encuentra.

- El periodo de mortalidad representa una mala instalación o ejecución del procedimiento lo que causaría fallas a temprana edad.
- El periodo normal dentro de los rangos 0,9 y 1,3 representa una tasa de fallos normalmente constantes pero que puede haber aleatoriedades debido a causas externas.
- El periodo de desgaste, expresada en una curva creciente, representa el desgaste natural del activo debido al paso del tiempo, las cuáles son inherentes del activo.

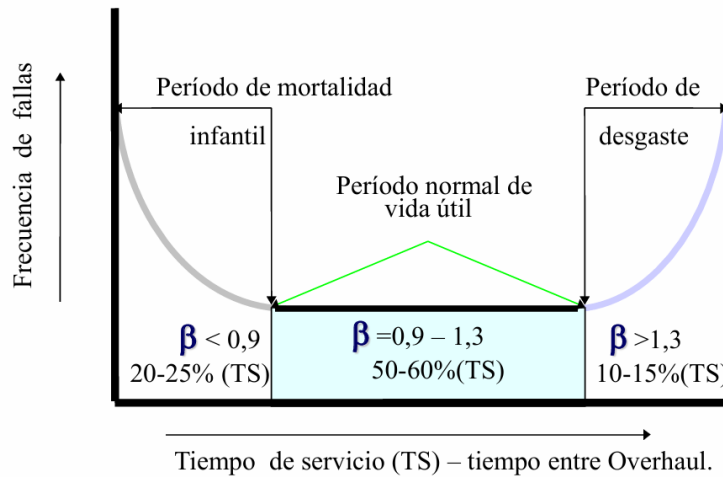


Figura 2-5 Curva de la bañera de un equipo, Ing. Con. I

Ahora el índice de salud calculado (HI) y su versión modificada (HIM) permiten ajustar dinámicamente la tasa de fallas del activo a través del parámetro $C(t)$, el cual se integra como un factor de ajuste en la función de Weibull. De esta forma, se obtiene una función de confiabilidad dependiente del deterioro real observado, mejorando las predicciones del comportamiento del activo a distintos escenarios de carga y operación.

$$C(t) = \frac{HIM(t)}{HI(t)} \quad (2-21)$$

El fundamento conceptual es que un índice de salud cercano a 0 o 1 indica un activo nuevo o en excelentes condiciones y 9 o 10 representa un activo muy degradado, con alta probabilidad de fallar. Éste índice **no es en sí mismo** una probabilidad, pero se interpreta como una variable que resume múltiples factores de degradación (edad, entorno, condición).

Según los estándares de la DNO y prácticas extendidas en confiabilidad, el índice de salud puede utilizarse para modificar dinámicamente la tasa de fallas de un modelo estocástico. Esto se realiza mediante el coeficiente en la ecuación 2-21.

Donde:

- HI(t): es el índice de salud base (sin modificadores)
- AHIM(t): es el índice de salud modificado con las condiciones reales.
- C(t): representa qué tanto se desvía la salud real respecto de la teórica.

Esto implica que un $C(t) > 1$ es porque está más deteriorado de lo proyectado y su tasa de fallas aumentaría. De lo contrario si $C(t) < 1$ es porque está mejor de lo esperado y su confiabilidad se incrementaría.

2.4 ÍNDICES DE SALUD Y LOS REGÍMENES DE FALLA DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La implementación de un índice de salud (HI), concebido de indicadores cuantitativos multidimensionales, permite una evaluación más precisa y dinámica del riesgo operativo. En una matriz de criticidad, la cartera de activos menos críticas pero que presentan un elevado deterioro reflejado por un índice de salud alto ($HI > 8$), la gestión estratégica tenderá hacia una estrategia reactiva controlada, la decisión más eficiente consiste en una política “*run-to-failure*”. Por otro lado, aquellos activos dentro de la cartera de activos de mayor criticidad pero que muestran un estado saludable ($HI < 5.5$) requieren una gestión proactiva centrada en prevenir un deterioro acelerado, para este caso si se justificarán inversiones en sistemas avanzados de monitoreo continuo y técnicas predictivas. La interpretación del índice de salud puede ser simplificada mediante categorías prácticas que facilitan su implementación en procesos reales de mantenimiento. En la tabla se detallan claramente estas categorías, su correspondencia con la vida útil estimada restante, y las acciones recomendadas para la gestión del activo según su estado actual (A. de la fuente, A. Crespo, E. Candón 2019).

AHI	Condition	Expected lifetime	Requirements
0.5 - 4	Very good	>5 years	Normal maintenance
4 - 5.5	Good	> 4 years	Normal maintenance
6 - 7	Fair	2 - 3 years	Increase diagnostic
7 - 8	Poor	< 2 years	Planning replacing
8 - 10	Very poor	End of life	Immediately replace

Tabla 2-7. Vida útil estimada, Serra et.al.

En este apartado se describe cómo, a partir de la caracterización de la confiabilidad de un activo mediante una distribución de Weibull- en sus parámetros de forma; $\beta < 1$, $\beta = 1$, $\beta > 1$ - y el cálculo de su índice de salud (HI), es posible definir umbrales de acción que guíen la estrategia de mantenimiento y/o reemplazo del activo.

Para definir estos perfiles de falla en decisiones prácticas, se define el índice de salud en la escala mencionada (0.5 = nuevo a 10 = próximo a fin de vida). A partir de estos índices se establecen tres umbrales:

- HI Óptimo ($HI > 5.5$): valor de HI tras cual la dinámica de falla del activo alcanza un nivel que justifica pasar de pruebas o ventas de garantía a operación normal con mantenimientos preventivos.
- HI Intermedio ($5.5 < HI < 8.0$): valor de HI a partir del cual los mecanismos de degradación hacen que la PoF comience a aumentar de forma apreciable, aunque aún controlable. Migración de un esquema preventivo a uno basado en condición.
- HI Crítico ($HI > 8.0$): valor de HI donde la probabilidad de falla se dispara- y los costes por fallas aumentan considerablemente-, imponiendo acciones urgentes de reparación, “overhaul” o reemplazo.

Se expresa la siguiente tabla 2-8 que define las posibles combinaciones según parámetro de forma (β), umbrales de índice de salud y nivel de criticidad de activos.

Nº	Índice de Salud	Criticidad	(β) Forma Weibull
1	Óptimo	Baja	$\beta < 1$
2	Óptimo	Baja	$\beta = 1$
3	Óptimo	Baja	$\beta > 1$
4	Óptimo	Media	$\beta < 1$
5	Óptimo	Media	$\beta = 1$
6	Óptimo	Media	$\beta > 1$
7	Óptimo	Alta	$\beta < 1$
8	Óptimo	Alta	$\beta = 1$
9	Óptimo	Alta	$\beta > 1$
10	Intermedio	Baja	$\beta < 1$
11	Intermedio	Baja	$\beta = 1$
12	Intermedio	Baja	$\beta > 1$
13	Intermedio	Media	$\beta < 1$
14	Intermedio	Media	$\beta = 1$
15	Intermedio	Media	$\beta > 1$
16	Intermedio	Alta	$\beta < 1$
17	Intermedio	Alta	$\beta = 1$
18	Intermedio	Alta	$\beta > 1$
19	Crítico	Baja	$\beta < 1$
20	Crítico	Baja	$\beta = 1$
21	Crítico	Baja	$\beta > 1$
22	Crítico	Media	$\beta < 1$
23	Crítico	Media	$\beta = 1$
24	Crítico	Media	$\beta > 1$
25	Crítico	Alta	$\beta < 1$
26	Crítico	Alta	$\beta = 1$
27	Crítico	Alta	$\beta > 1$

Tabla 2-8. Estrategias de mantenimiento basado en HI.

La condición en tiempo real dado por un HI convierte la probabilidad de falla dada por un MTBF en un valor dinámico, sensible a factores de degradación monitoreados continuamente. Además, permite identificar si las intervenciones mueven activos de una posición HI Crítica, Óptima e Intermedia, aun cuando su parámetro de forma (β) de diseño no cambie. Ejemplo, un compresor clasificado con una media criticidad (media probabilidad de falla y altos costos) puede variar si su índice de salud se recupera a un óptimo reduciendo una probabilidad de falla media a baja. El β (y, en general, la probabilidad de falla) ya brindaba un punto de partida estadístico; el AHI lleva la gestión de activos al terreno predictivo y condicional.

La literatura especializada valida el enfoque de combinar el Asseth Health Index con una matriz de criticidad para orientar decisiones de mantenimiento (CM, PM, CBM), reacondicionamientos o reemplazos, utilizando umbrales definidos como gatillo para dichas acciones (Ross Robert, 2017)

2.5 FMECA PARA ASIGNACIÓN DE MODIFICADORES

Para asegurar la solidez y trazabilidad de los criterios de priorización de riesgos y selección de modificadores en el índice de salud de activos, se ha implementado una matriz FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) específica para las bombas criogénicas sumergidas, siguiendo las recomendaciones de la norma IEC 60812:2018 y la guía de recolección de datos de fallas de ISO 14224:2016.

Esta herramienta permite identificar de manera sistemática los principales modos de falla, sus causas y efectos sobre la confiabilidad y disponibilidad operacional, así como evaluar la criticidad de cada uno a través del cálculo del Risk Priority Number (RPN), considerando los factores de severidad, ocurrencia y detección.

Cada modo de falla relevante ha sido vinculado explícitamente a los modificadores de salud aplicados en el AHI, lo que garantiza que las variables seleccionadas reflejen los mecanismos de deterioro más críticos para estos tipos de equipos.

La asignación de los valores de severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D) en la matriz FMECA (tabla 2-9).

- Severidad (S): Evaluada en una escala de 1 a 10, donde 1 corresponde a modos de falla sin impacto relevante y 10 a consecuencias catastróficas para la seguridad, medioambiente o la operación. La valoración se basa en el efecto final de la falla sobre la disponibilidad del sistema, la seguridad y el costo asociado

- Ocurrencia(O): Estimada en función de la frecuencia histórica observada en bases de datos industriales y reportes como los de DNV 2014 (Anexo), en una escala de 1 (muy rara) a 10 (muy frecuente).
- Detección (D): Considera la probabilidad de que el modo de falla pueda ser anticipado o detectado antes de que se manifieste completamente, en una escala de 1 (fácilmente detectable por sistemas de monitoreo y alarmas) o 10 (virtualmente indetectable hasta la ocurrencia).

N°	Modo de Falla	Causa	Efecto	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN	Modificador AHI	Acción recomendada
1	Desgaste de rodamiento	Lubricación deficiente, desgaste natural	Vibraciones, parada por TRIP	9	4	4	144	Vibración, ciclos de arranque	Inspección y reemplazo programado, monitoreo de vibraciones
2	Fuga en sello mecánico	Envejecimiento, vibraciones	Fuga, activación de detectores de gas	8	3	5	120	Nivel, presión, vibración	Cambio de sellos por condición, revisión alineación
3	Cavitación	Baja presión de succión, NPSH Insuficiente	Daño impulsores, daño en componentes internos.	7	2	3	42	Caudal, presión, vibración	Ajuste de operaciones, limpieza de filtros, controlar caudal de trabajo.
4	Daño impulsor	Sólidos en fluido, cavitación	Pérdida de caudal, TRIP de bomba	8	2	4	64	Caudal, vibración	Inspección periódica, filtrado aguas abajo.
5	Fallo motor	Sobrecalentamiento, aislamiento deficiente	Parada de bomba por detención de motor	9	2	4	72	Consumo eléctrico, vibración	Inspección preventiva motores eléctricos, protecciones o recambio de motor.
6	Fallo cable eléctrico	Fatiga térmica/mecánica, humedad	Deterioro parcial de la bomba.	7	3	3	63	Monitoreo de aislamiento, alarmas de Fire and Gas	Pruebas dieléctricas, reemplazo de ser necesario.
7	Obstrucción Succión	Suciedad, incrustaciones	Caída de caudal, parada de bomba para selección de equipo redundante.	6	2	3	36	Caudal, presión de succión	Monitoreo de caudal a presión normal de trabajo, programar mantenimiento para reparar.
8	Fallo estructural	Fatiga, corrosión, daño criogénico, Golpes de ariete en piping.	Fugas de gas, daños ambientales por escape de GNL.	10	1	6	60	Inspección visual, vibraciones, Temperatura de flujo	Pruebas operacionales, reemplazo de aislamientos, verificación de fugas.

Tabla 2-9. FMECA, a partir de reporte DNV (2014).

Los modos de falla con mayor RPN en la matriz FMECA fueron tomados como referencia prioritaria para la selección y ponderación de los modificadores de salud en el índice AHI. De esta manera, la metodología asegura que los indicadores de condición monitoreados están alineados con los riesgos funcionales más críticos del equipo. Ahora se profundiza a nivel causa raíz; por cada modo se documentó mecanismo, disparador, umbral, prueba de verificación y acción de control.

Desgaste de rodamiento – RPN 144

En régimen criogénico, la combinación de película lubricante insuficiente y desalineación térmica acelera el micro-pitting y el crecimiento de holguras, elevando la vibración y reduciendo la confiabilidad.

- Causa raíz: película insuficiente a -160°C + desalineación térmica del conjunto \rightarrow fatiga superficial en rodamientos (BPFO/BPFI) y holguras.
- Disparador típico: arranque en frío con rampa corta y operación sostenida fuera de mejor punto de eficiencia de la bomba (BEP).
- Evidencia: vibración global $>$ histórico, picos de BPFO/BPFI y armónicos de $1x/2x$, tendencia de aceleración global RMS.
- Verificación: análisis espectral y de envolvente, orbitas y verificación de alineación “en caliente” y revisión de holguras.
- Acción de control: secuencia pre-cool (enfriamiento) y rampa de arranque, ajuste de holguras criogénicas, límites de vibración en DCS/Bentley Nevada.
- Vinculación Modificador: variable medida de vibración/temperatura.

Cavitación y daño de impulsor – RPN 64

La insuficiencia de NPSH o la aireación generan pitting/erosión del impulsor y pérdida de eficiencia, el fenómeno se manifiesta en banda de alta vibración y caída de presión.

- Causa raíz: $\text{NPSH}_a < \text{NPSH}_r$ y/o aireación de succión \rightarrow cavitación y erosión de álabe.
- Disparador típico: demanda súbita, filtro de succión parcial y nivel bajo de estanque.
- Evidencia: caída de diferencial de presión y de eficiencia de la bomba, ruido característico y eventos de baja succión en DCS.
- Verificación: cálculo de margen NPSH, inspección de impulsor y filtros, análisis de partículas.
- Acción de control: control de rampa de caudal, limpieza/monitoreo de filtros y succión y límites operativos por NPSH en lógicas de instrumentación.
- Vinculación de Modificador: vibración/eficiencia en la succión (presión de succión).



Fugas en sellos mecánicos – RPN 120

En equipos con sello, los choques térmicos y la vibración inducen microfisuras.

- Causa raíz: choque térmico + vibración > umbral → microfisuras/desalineo de caras.
- Disparador típico: oscilación de valores de caudal, caídas de presión.
- Evidencia: detección de fugas por activación de alarmas Fire&Gas o en inspecciones rutinarias.
- Verificación: inspección de caras, correlación de evento y vibración.
- Vinculación de Modificador: fugas/vibración.

Tras el desarrollo del marco teórico y metodológico, en donde se incluyó la fundamentación de la gestión de activos basada en la condición, la selección y justificación de los modificadores del índice de salud mediante un análisis FMECA se dispone ahora de una base sólida para la aplicación práctica de la metodología propuesta.



**CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO, IMPLEMENTACIÓN DEL AHI PARA UNA
BOMBA CRIOGÉNICA DE BAJA PRESIÓN Y SU IMPACTO EN LA
EVALUACIÓN DE CONFIABILIDAD Y RIESGO OPERATIVO.**

Una vez revisado el marco teórico propuesto por la DNO y detallado el procedimiento de implementación del índice de salud de activos, este capítulo aborda su aplicación práctica en una bomba criogénica de baja presión mencionada anteriormente. Dado el nivel de la criticidad que representa este equipo dentro del proceso, se considera un caso representativo para validar la efectividad del índice como una herramienta de soporte para la toma de decisiones en el mantenimiento.

El desarrollo de este capítulo contempla dos ejes principales. Primero, la recopilación y organización de datos históricos de mantenimiento y operación del activo, a partir de los cuales se construye el índice (Anexos). Segundo, se establece la correlación entre el índice de salud obtenido y los parámetros de confiabilidad del activo. Ajustando la tasa de fallas mediante los parámetros de la distribución de Weibull y la afinación la probabilidad de falla postulado por la DNO Common Network (2021).

Este enfoque busca demostrar cómo un enfoque estructurado de evaluación de la condición de los activos, combinado con herramientas probabilísticas de confiabilidad, pueden ofrecer un visión integral del estado operativo del equipo y facilitar una gestión eficiente.

3.1 **BOMBA CRIOGÉNICA, ESTANQUE 101**

Un ejemplo representativo para estos casos es la bomba 300-PM-101-C de la marca Nikkiso, la cual inició sus operaciones en los estanques en el año 2015. De acuerdo al fabricante, esta bomba tiene una vida útil estimada de 25000 horas.

Datos operativos		
Categoría del equipo	Centrifugal Pump	
Fabricante	Nikkiso SA	
Tag del equipo	300-PM-101-C	
Vida normal estimada	25000	hr
Carga nominal	197	kW
Carga en el punto de		
Garantía	169.42	kW
Uso Anual	Variable	

Tabla 3-1 Bomba 101C, Identificación equipo ISO 14224.

Con estos datos, se puede iniciar la implementación de la metodología descrita, empleando los factores de localización y de carga proporcionados en las tablas 1-2 a 1-5, los cuales son aplicables al contexto de la bomba ubicada cerca de la costa.

Este entorno, caracterizado por temperaturas ambientales favorables, promueve en gran medida la formación de atmósferas corrosivas. Para calcular la vida estimada de la bomba, se utiliza la ecuación 1-3, correspondiente a los pasos 1 y 2 de la metodología de implementación. Este cálculo incorpora los valores derivados de los productos y cocientes de los factores previamente mencionados, obteniendo una vida útil estimada de 25278 horas (tabla 3-2).

Se elabora una tabla de valores que representa la curva de vida útil del activo, considerando sus horas anuales de operación y los índices de salud. Estos índices varían desde “as good as new” (0.5) hasta el momento en que el activo supera el índice de vida estimada (5.5), el cual se visualiza en el gráfico mediante una línea constante de color gris.

En el siguiente paso, se calcula la tasa de envejecimiento del activo utilizando la ecuación 2-3. Esta ecuación establece que el índice de salud inicial se determina como el producto entre el índice correspondiente a un activo nuevo y la exponencial del deterioro en un tiempo determinado. A partir de este cálculo, se genera la curva de vida estimada de la bomba 101-C, que se ilustra en el gráfico 3-1 y tabla 3-3.

N°	Factor	Valor
1	Fdc	1.15
2	Fexp	1
3	Ft	1
4	Fam	1
5	Fp	1
6	Fe	1.15
7	Fc	0.86
8	Vida estimada	25278
9	Tasa de vejez	0.000094944

Tabla 3-2 Paso a paso, DNO 2021.

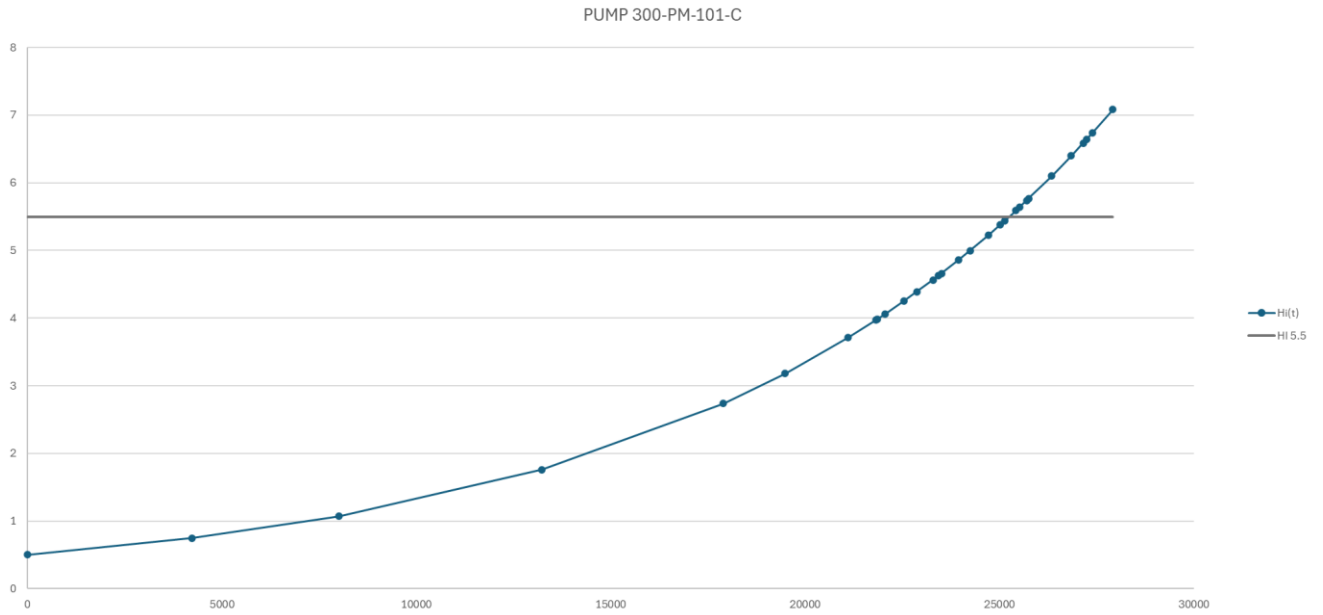


Gráfico 3-1 Vida estimada en relación con un índice de salud.

	Hi(t)	HI(-)
2014	0	0.5
2015	4241	0.75
2016	8007	1.07
2017	13237	1.76
2018	17901	2.74
	19488	3.18
	21104	3.71
	21822	3.97
2019	21864	3.99
	22055	4.06
	22552	4.25
	22878	4.39
2020	23295	4.57
	23440	4.63
	23510	4.66
	23957	4.86
2021	24247	5.00
	24716	5.23
	25028	5.38
	25133	5.44
2022	25424	5.59
	25528	5.64
	25706	5.74
	25756	5.77
2023	26344	6.10
	26850	6.40
	27159	6.59
	27241	6.64
2024	27389	6.73
	27918	7.08
	27971	7.12
	28348	7.38

Tabla 3-3 HI derivado de la tasa de envejecimiento, ecuación 2-4.

Se observa que el activo ha superado un índice de salud (HI) de 5.5, lo cual indica que su deterioro podría incrementarse a medida que aumentan las horas de operación. Este

hecho fue identificado por el departamento de mantenimiento y operaciones, lo que llevó a reducir el uso de la bomba con el fin de evitar posibles fallas. Esta medida preventiva se implementó para mitigar riesgos, considerando que, de haberse continuado con el uso habitual, el equipo podría haber sufrido fallas significativas.

Para el siguiente paso se necesita obtener un índice de salud de activos modificado, dependiente del entorno del activo. Para esto se realizó un análisis detallado sobre las características y contexto en el que se encuentra el activo, para eso es necesario recopilar información acabada sobre la operación, el mantenimiento efectuado y confiabilidad que modifiquen de forma directa el estado de deterioro del equipo. Estos modificadores son de carácter específico del equipo lo que no es una generalización u estándar para otros activos que se quieran estudiar.

A continuación, se presentan los modificadores de salud y confiabilidad escogidos para el activo según la tabla 2-7 del FMECA confeccionado.

1) Caudal: Un bajo flujo de GNL implicaría una disminución en la eficiencia de la bomba lo que provoca que parte de la energía se transforme en calor, elevando la temperatura y acelerando el desgaste de los componentes internos.

2) Nivel del tanque: Un bajo nivel puede provocar una pérdida de cebado, lo que significa que no hay suficiente líquido en la bomba para mantener la succión, esto puede llevar a operaciones en seco, causando daños por fricción y calor.

3) Vibraciones: Uno de los problemas comunes es el desbalance en el rotor causado por vibraciones significativas. Esto ocurre cuando el centro de masa del rotor no coincide con el centro de rotación, lo que genera fuerzas radiales y axiales desiguales.

4) N° de partidas: Cada arranque y parada genera estrés mecánico en los componentes de la bomba, como los cojinetes, sellos e impulsores. Esto puede llevar a un desgaste prematuro. Además, los motores eléctricos experimentan una corriente de arranque elevada cada vez que se encienden. Si la bomba se arranca y se detiene con frecuencia, el motor puede sobrecalentarse y sufrir daños.

5) Temperatura de succión: una alta temperatura de succión se da por la evaporación del GNL, lo que provocaría que la bomba succione vapor de gas y de lugar a una eventual cavitación, donde se formen burbujas y colapsen dentro de la bomba, generando grandes daños y costos de mantenimiento.

6) Cambio de cargas: Las variaciones en la carga de operación en una bomba criogénica puede causar muchos daños y de los ya mencionado, a esto se puede adicionar fluctuaciones de presión en el sistema de tuberías, lo que conlleva a golpes de ariete y posibles daños a las válvulas y conexiones.

En cuanto a los modificadores de fiabilidad que afectan a la bomba existen 2:

1) Porcentaje de inactividad: La inactividad prolongada conlleva a eventuales dificultades para arrancar debido a endurecimiento de componentes internos o degradación de sellos y juntas lo que provocaría fugas.

2) Número de mantenimientos: El mantenimiento frecuente se traduce en altos costos tanto en términos de piezas de repuesto como mano de obra, afectando el presupuesto operativo. Además, cada intervención de mantenimiento conlleva a riesgos humanos en la instalación incorrecta de componentes o uso de piezas inadecuadas afectando el rendimiento y seguridad de la bomba.

Los rangos operativos serán determinados considerando los valores normales de funcionamiento de la bomba bajo un contexto controlado. Las tablas 3-4 y 3-5 ilustran los modificadores analizados, los cuales asignan al activo un impacto variable según su historial y su situación actual.

Para continuar con el caso de estudio, es importante aclarar que el índice de salud (HI) fue calculado desde el inicio de las operaciones en 2015, mientras que su índice de salud modificado se calcula a partir de su último periodo de evaluación en 2018 hasta la fecha actual (diciembre de 2024). Este ajuste no afecta el análisis, ya que el activo, con un $HI = 5.5$, se encuentra dentro de su vida estimada normal, donde el deterioro permanece en un rango admisible.

Es relevante mencionar que los modificadores de salud dependen de las horas de funcionamiento trimestrales de la bomba y pueden variar según los requerimientos de la planta. Para alimentar la tabla de modificadores de salud, será necesario realizar una investigación y acceder a los datos históricos de la bomba, que generalmente están almacenados en el sistema de monitoreo de activos de planta “Exaquantum”.

Modificadores de salud					
N°	Categoría	Bajo flujo	Rango óptimo	Sobreflujo	
1	Caudal	1.4	1	1.3	
N°	Categoría	Nivel óptimo	Nivel Bajo	Nivel Alto	
2	Nivel de tanque	1	1.3	1.1	
N°	Categoría	Bien	Seguimiento	Alarma	
3	Vibraciones	1	1.1	1.2	
N°	Categoría	Menor a 100	Entre 100 y 200	Entre 200 y 300	Mayor a 300
4	N° de partidas	1.1	1.15	1.2	1.25
N°	Categoría	Nivel Óptimo	Nivel Bajo	Nivel Alto	
5	Temperatura de succión	1	1	1.3	
N°	Categoría	Sobre R.O	Rango óptimo	Bajo R.O	
6	Carga	1.15	1	1.4	

Tabla 3-4 Modificadores de salud.

Modificadores de fiabilidad				
N°	Categoría	0-50%	50%-75%	75%-100%
1	% de inactividad	1	1.05	1.1
N°	Categoría	<1	1	>1
2	N° de mantenimientos	1	1.1	1.3

Tabla 3-5 Modificadores de confiabilidad.

Para los cálculos de un índice de salud modificado del activo se utilizaron las ecuaciones 2-7, 2-8, 2-9 y será contrastado con el gráfico 3-1.

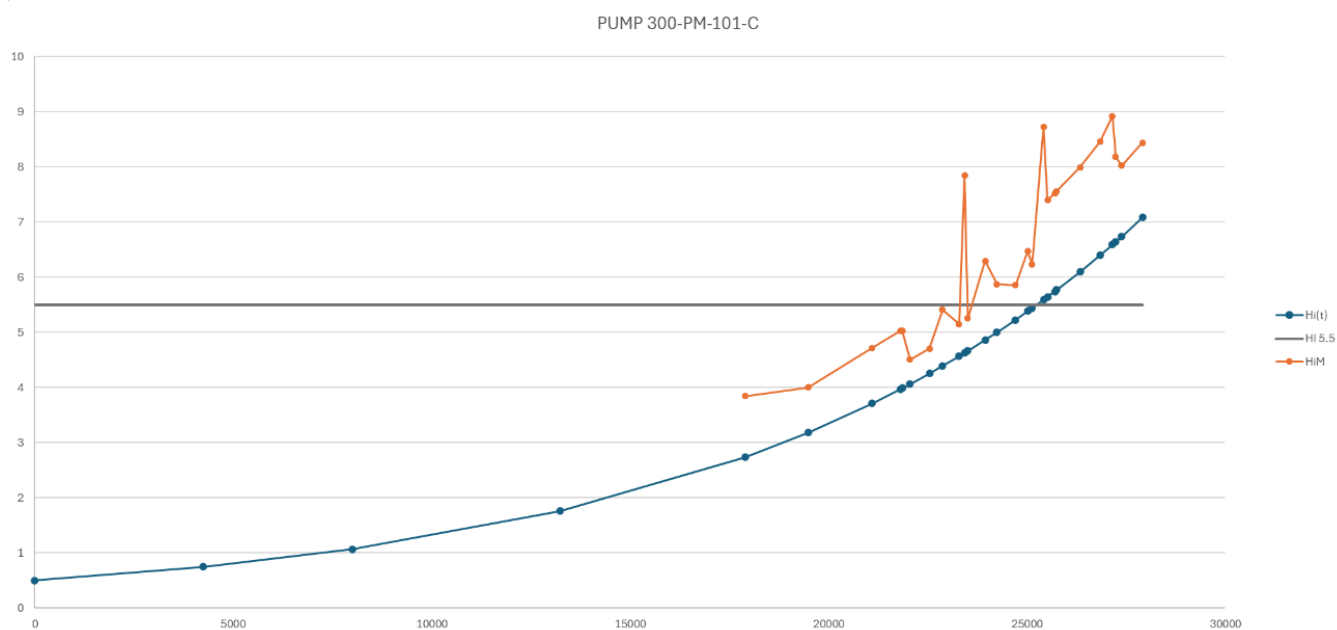


Gráfico 3-2 Índice modificado v/s Índice inicial.

En el gráfico 3-2 se observa una línea anaranjada que inicia su trayectoria a partir de las 17,901 horas de operación de la bomba, posicionándose por debajo de la vida útil estimada del activo. Esto indica que, en ausencia de factores externos que interrumpen su funcionamiento, no se presenta un riesgo significativo que requiera un análisis detallado en esta etapa.

Entre las 23,400 hr y 25,500 horas de operación, la pendiente del AHIM muestra un incremento pronunciado, ampliando de manera considerable la diferencia entre ambas líneas de índice de salud (HI). Esto evidencia que los modificadores de salud tienen un impacto significativo en el estado de deterioro del activo, al punto de influir en la extensión o reducción de su vida útil estimada entre periodos de evaluación.

Es esperado que la curva AHIM tenga comportamientos oscilantes que “regresen a la media” y refleja la sensibilidad a la condición, no solo a la edad. Los cambios bruscos responden a condiciones severas a las que se ha expuesto.

Aunque el grado de detalle en el análisis puede profundizarse según los requerimientos o la criticidad del activo en la planta, es fundamental tomar decisiones basadas en el AHIM, ya que este indicador refleja de manera más precisa las condiciones operativas reales del equipo. De esta forma, se obtiene una mejor comprensión del contexto y se optimizan las estrategias de gestión del activo (Figura 3-1).

Una vez hemos obtenido las curvas de los índices de salud del activo, se debe seleccionar el valor más reciente de AHIM (índice modificado), pues este es el que representa la **condición real** para ajustar el modelo Weibull.

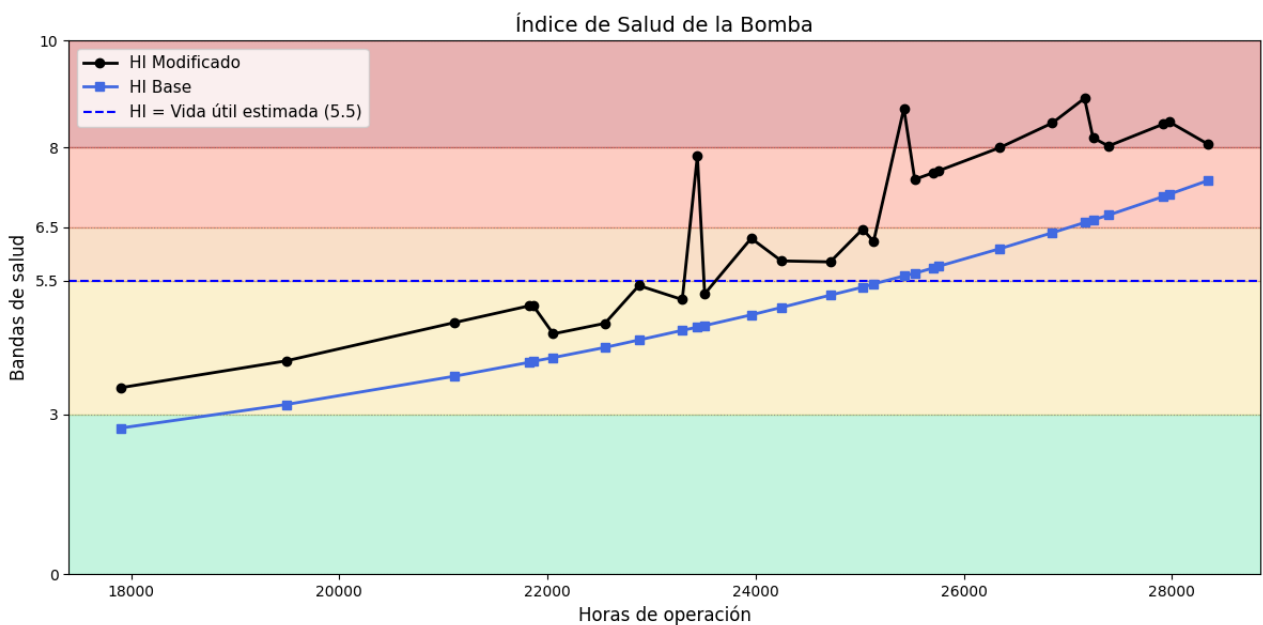


Figura 3-1 Índice de banda respectiva a la bomba y su AHI.

Tradicionalmente, la priorización de activos críticos en la organización se realiza mediante matrices de criticidad, las cuáles combinan la probabilidad de falla y la

consecuencia de esta. Sin embargo, estas matrices suelen depender de apreciaciones subjetivas, sin considerar en detalle la condición operativa y el deterioro real de los activos. El AHI permite cuantificar la probabilidad de falla de manera dinámica y específica para un activo específico, de esta manera se puede refinar la matriz de criticidad clásica, la DNO así lo comenta “*El AHI provee una estimación más dinámica y específica del riesgo... que puede combinarse con la consecuencia para una priorización más refinada*” (DNO, Sección 4.2, p.13).

Ahora, dado que AHI corresponde a la evaluación puntual del estado actual del activo, el coeficiente de ajuste $C(t)$ se aplica exclusivamente a proyecciones de confiabilidad futuras. No se extiende a periodos anteriores, ya que el índice no representa una evolución histórica, sino una muestra de qué tan diferente es el estado actual del activo en comparación con lo que se espera en condiciones normales. Según lo establecido por DNO (2021, p.14) “*el índice de salud no es un indicador retrospectivo o histórico, sino una medida prospectiva utilizada para apoyar la planificación basada en riesgo*” Las condiciones actuales se utilizan para ajustar la tasa de fallo proyectada sin reescribir los registros históricos del desempeño (Moubray, 2001). Por lo tanto, el coeficiente $C(t)$ se utiliza únicamente para ajustar la confiabilidad Weibull en el horizonte de análisis posterior a la fecha de diagnóstico del AHI.

Para el cálculo del coeficiente de ajuste se ha elegido el último periodo de monitoreo de la bomba (año 2024) dividido en cuatro trimestres, lo cual se expresa en el siguiente extracto (tabla 3-6).

Periodos: (Año/trimestre)		Modificadores de Salud						Modificador de Fiabilidad		HI Real	Hi M	C(t)
		Caudal	Carga	Tasp	Nivel tanque GNL	Vibraciones	Nº partidas	% Inactividad	Grandes mantenimientos			
2024	T1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1	1	6.72	8.02	1.1942918
	T2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1	1	7.06	8.44	1.1942918
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1	1	7.10	8.48	1.1942918
	T4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	1	7.36	8.06	1.0947674

Tabla 3-6 Coeficiente de ajuste, extraído de la tabla matriz.

Una vez determinado el coeficiente $C(t)$, se procede a ajustar la función de confiabilidad Weibull para reflejar el impacto real de la condición técnica del activo sobre su probabilidad de falla futura. En el presente estudio, los parámetros de Weibull estimados para la flota de bombas criogénicas son $\alpha = 27310$ horas (parámetro de escala) y $\beta = 1.86$ (parámetro de forma), estos fueron obtenidos a partir del análisis de tiempos de operación hasta mantenimiento mayor de equipos similares, información del fabricante y datos de operación; 5813, 6420, 6475, 6759, 9636, 12070, 13961, 15277, 17493, 18568,

20372, 20737, 20866, 23881, 24220, 24228, 25085, 25233, 26531, 27802, 30185, 31289, 31307, 33036, 34088, 35741, 36113, 37283, 38849, 46298 ... (horas) (figura 3-2). El valor de ajuste será implementado en la ecuación 2-22.

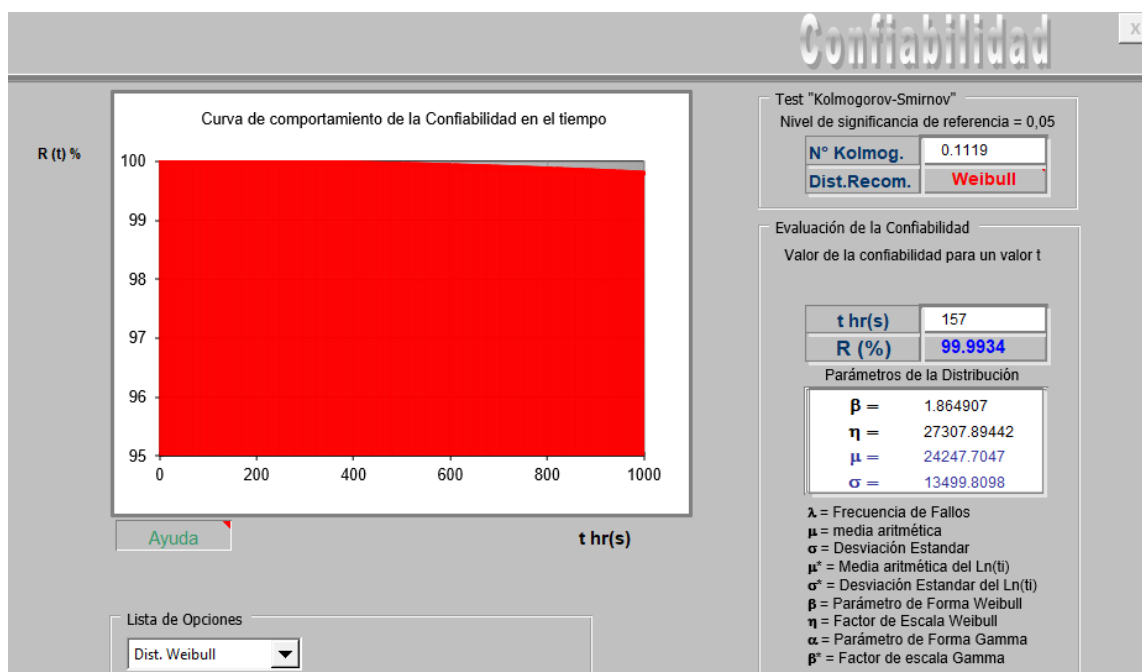


Figura 3-2 Relmant Risk, TO hasta fallar para bombas criogénicas.

Respaldado por la DNO, sección 4.3.3, permite proyectar la confiabilidad y el riesgo de falla del activo bajo su condición, integrando información técnica real a los modelos probabilísticos tradicionales. Los valores ajustados de la curva Weibull serán utilizados para analizar de forma didáctica el comportamiento histórico del activo para proyectar un escenario futuro (tabla 3-7), facilitando la estimación precisa de probabilidad de falla y el costo por indisponibilidad de la bomba. De esta forma, se contribuye al logro del objetivo general, en este caso, implementar el índice de salud y analizar su relación con la confiabilidad del equipo.

Año	(t)	R(t)	R(t) ajustado	F(t)
2014	0	100%	100%	0%
2015	4200	96.97%	96.97%	3.03%
2016	8000	90.31%	90.31%	9.69%
2017	13200	77.21%	77.21%	22.79%
2018	21800	51.81%	49.82%	48.19%
2019	22800	48.93%	46.89%	51.07%
2020	24000	45.55%	43.46%	54.45%
2021	25200	42.27%	36.10%	57.73%
2022	25800	40.67%	34.49%	59.33%
2023	27300	36.81%	30.65%	63.19%
2024	28400	34.11%	28.01%	71.99%
2025	29500	31.53%	25.51%	74.49%
2026	32000	26.11%	20.41%	79.59%

Tabla 3-7 Factor de ajuste a la confiabilidad y su proyección.

La tabla precedente ilustra la evolución anual de la confiabilidad estimada del activo LP101C, calculado con los parámetros mencionados y ajustado desde el año 2021 mediante el coeficiente $C(t) = 1.09476$ derivado de la ecuación 2-21, se observó que a partir de ese año el índice del activo superó el 5.5 (HI3). A partir del deterioro captado en la condición técnica del activo, la proyección de confiabilidad decrece de forma “acelerada” respecto a su curva base, pasando de un 42.27% en 2021 a un 26.11% en 2026.

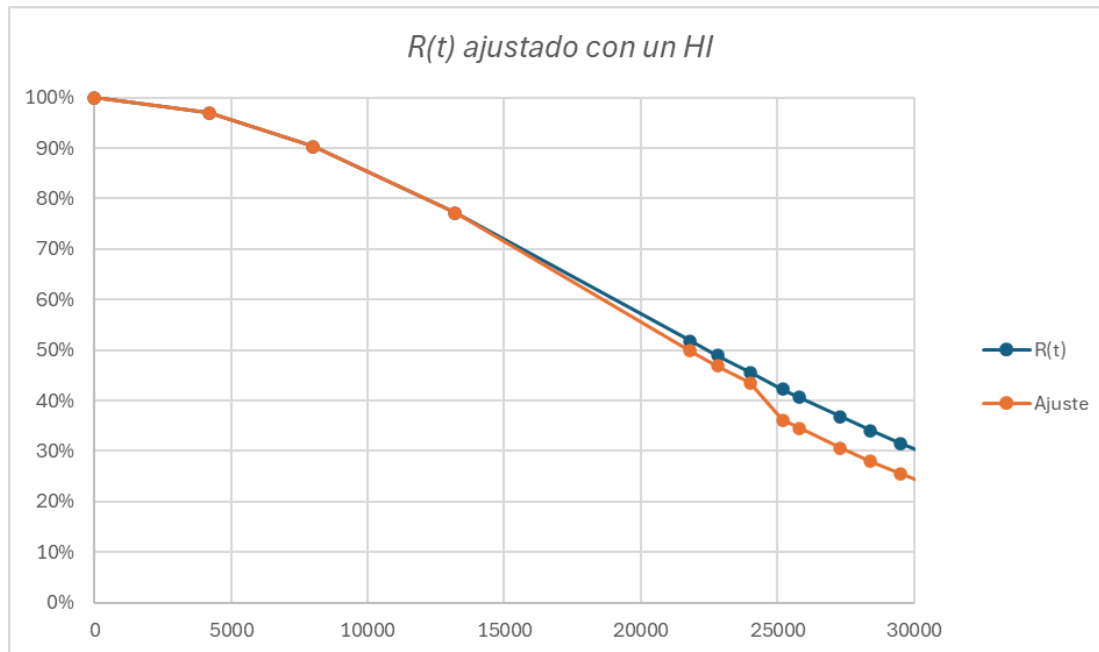


Gráfico 3-3 R(t) Base vs R(t) Ajustada.

El gráfico muestra la evolución de la confiabilidad proyectada para la bomba LP101C a lo largo de su vida útil, expresada como la probabilidad de no fallar en las horas de operación acumuladas hasta la fecha. La curva azul representa la confiabilidad estimada con una distribución de Weibull parametrizada con datos históricos, fabricante y operaciones. La curva anaranjada, por otro lado, incorpora el ajuste dinámico mediante el coeficiente $C(t)$.

Se observa que a partir de las 25200 horas aproximadamente, la confiabilidad ajustada comienza a decrecer más rápido que la base, reflejando un impacto del deterioro real detectado por los indicadores de salud. Se manifiesta el valor técnico de integrar el monitoreo de la condición en la modelación del riesgo de falla, ya que la proyección tradicional, basada en juicios expertos, edad y promedios históricos *subestimarían* o *sobrestimarían* el riesgo real de la bomba en los periodos recientes.

Por lo tanto, la $R(t)$ ajustada con $C(t)$ cae más rápido que la $R(t)$ base cuando $C(t) > 1$, validando que los modificadores capturan degradación acelerada. Esto es coherente con el flujo metodológico DNO (PoF – Hi) que amplifica la probabilidad de falla a mayores valores de puntaje de salud.

3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONFIABILIDAD Y SALUD BOMBAS LP101A Y LP101B

Con fines comparativos, se escogieron dos bombas criogénicas de baja presión adicionales, LP101A y LP101B, ambas instaladas bajo el mismo sistema de almacenamiento, pero con historiales de operación y mantenimiento diferentes.

La LP101A ha presentado dos ciclos de vida claramente diferenciados: el primero, que comprende entre 2015 y 2023, en donde se interrumpió el funcionamiento para la ejecución de un “overhaul”. El segundo ciclo comprende desde 2024 hasta la fecha de hoy, con una proyección hasta el año 2029. Por otra parte, la LP101B registra una trayectoria de operación desde 2009, acumulando horas de operación hasta las 25000 hr de servicio con un “overhaul” a una edad temprana de 18200 hr. Los historiales de operación fueron recopilados a partir de los registros históricos de la planta y constituyen la base para el análisis comparativo de salud y confiabilidad, en la tabla 3-8 se resumen los índices de salud respectivos a cada bomba con el objetivo de resumir al lector los hallazgos de la implementación.

3.2.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AHI E INTERPRETACIÓN CON WEIBULL

Para ambas bombas, se calcularon los valores históricos del índice de salud base (HI), el índice de salud modificado (HIM), y el coeficiente de ajuste $C(t)$ en cada periodo operacional relevante. A partir de estos resultados, se proyectaron las curvas de confiabilidad teórica y ajustada, integrando el coeficiente $C(t)$ siguiendo los lineamientos de la DNO. La tabla 3-7 y 3-8 junto a los gráficos 3-4 y 3-5 presentan la evolución temporal de los índices de salud y las curvas de confiabilidad para las bombas. Se observa cómo la incorporación de los modificadores de condición y salud permiten identificar periodos de deterioro acelerado y cómo se reinician los indicadores cuando se ejecuta un mantenimiento mayor.

Año	(t)	R(t)	R(t) ajustado	F(t)
2015	0	100%	100.00%	0%
2016	1100	99.95%	99.94%	0.05%
2017	2100	99.78%	99.68%	0.22%
2018	6000	97.56%	96.52%	2.44%
2019	12000	88.56%	84.28%	11.44%
2020	17200	75.72%	66.56%	24.28%
2021	19400	69.29%	58.46%	30.71%
2022	21900	61.58%	47.83%	38.42%
2023	23800	55.59%	40.24%	44.41%
2024	0	100.00%	100.00%	0.00%
2025	5000	98.39%	97.52%	2.48%
2026	12000	88.56%	82.83%	17.17%
2027	15000	81.62%	72.99%	27.01%
2028	20000	67.47%	54.33%	45.67%
2029	25000	51.82%	36.09%	63.91%

Tabla 3-8 R(t) LP101A y su confiabilidad ajustada.

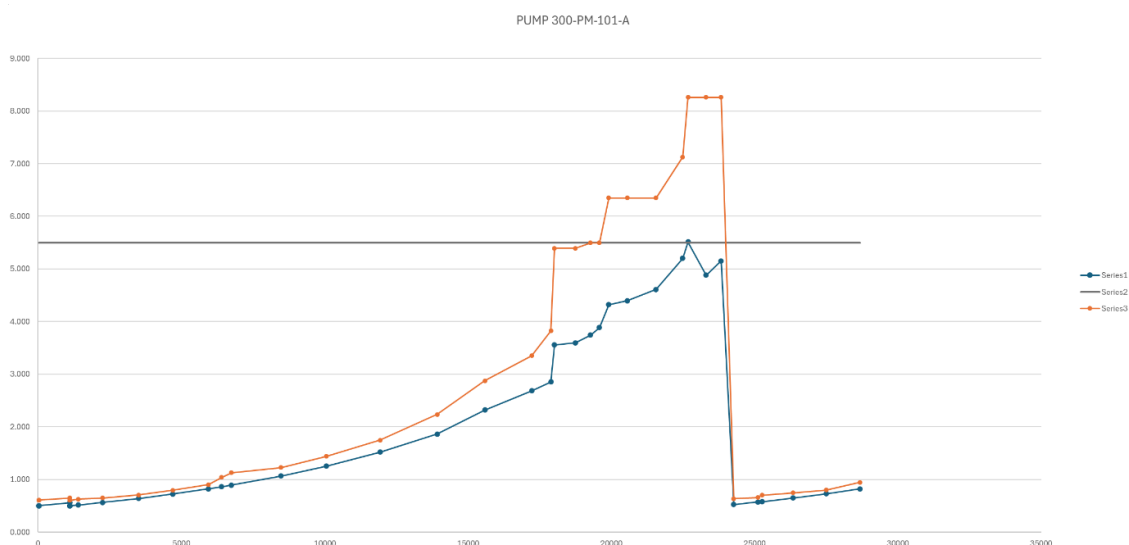


Gráfico 3-4 HI vs HIM, LP101A.

Año	(t)	R(t)	R(t) ajustado	F(t)
2009	1400	100%	99.91%	0%
2010	5600	97.92%	97.76%	2.08%
2011	8200	95.06%	94.71%	4.94%
2012	10200	91.98%	91.41%	8.02%
2013	13400	85.50%	84.51%	14.50%
2014	18200	72.85%	71.16%	27.15%
2015	3000	99.50%	99.28%	0.50%
2016	5600	97.92%	97.00%	2.08%
2017	6200	97.37%	96.23%	2.63%
2018	8800	94.22%	91.76%	5.78%
2019	10000	92.32%	89.10%	10.90%
2020	11200	90.15%	86.09%	13.91%
2021	12300	87.93%	83.04%	16.96%
2022	15000	81.62%	74.58%	25.42%
2023	20000	67.47%	56.64%	43.36%
2024	25000	51.82%	38.69%	61.31%

Tabla 3-9 R(t) LP101B y su confiabilidad ajustada.

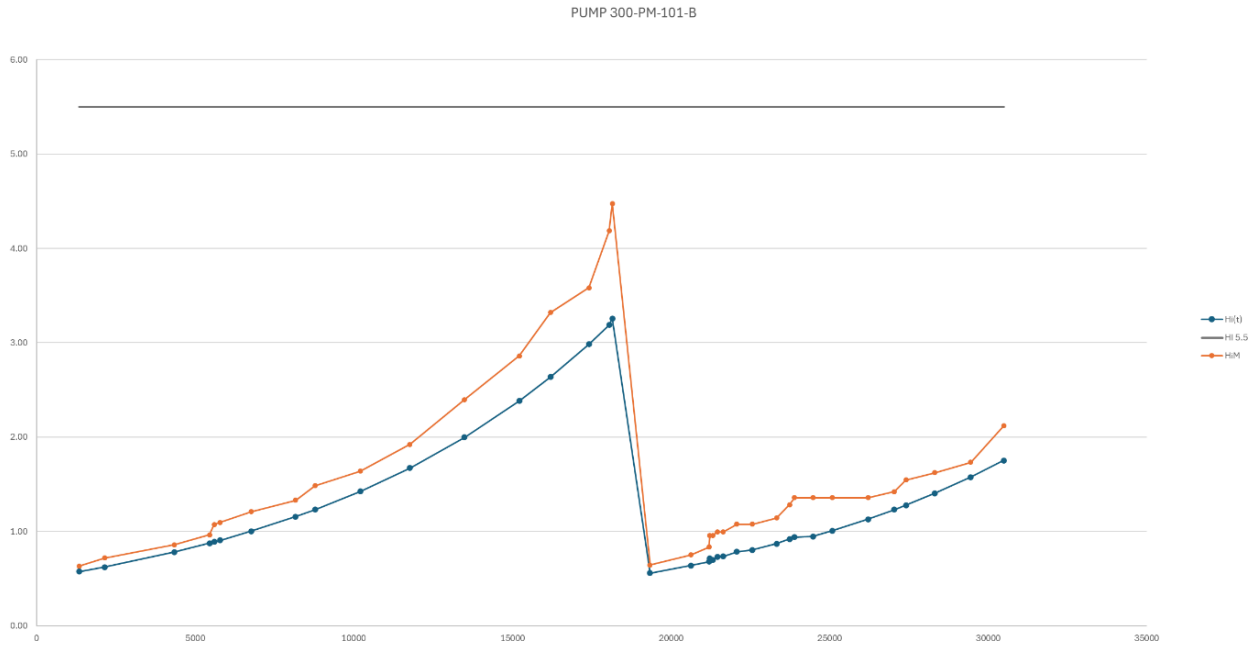


Gráfico 3-5 HI vs HIM LP101B

3.2.2. DISCUSIÓN DE HALLAZGOS

Se evidencia que la bomba LP101A (gráfico 3-4) experimentó un deterioro significativo antes del “overhaul” alcanzando valores críticos de HIM (superiores a 8) y una confiabilidad ajustada de apenas 30.6% en el punto de máxima operación. En contraste, la bomba LP101B (gráfico 3-5) mantiene un nivel de salud dentro de rangos aceptables (Banda HI 3), con 25000 horas de servicio, lo que indica que habría que tomar decisiones pronto para una segunda intervención.

La LP101C ha acumulado 28900 horas de operación sin intervenciones de mantenimiento mayor, presentando valores de HIM crecientes, con un máximo de 8.48 (Banda HI 5), lo que la sitúa en un umbral crítico. Al calcular la confiabilidad ajustada mediante el coeficiente $C(t)$ se obtiene una probabilidad de falla acumulada de 66.2% a las 28400, inferior a la observada en la LP101 A al momento del overhaul y algo superior a la de la LP101B bajo condiciones de operación similares (tabla 3-10).

Bomba	Horas op.	HIM	R(t)	R(t) ajustada	vibraciones	Deten. 2023–2024	Observación clave
LP101A	23.800 h	5,79	55,59%	30,6% (pre-overhaul)	> umbral	79 totales	Δ HI/HIM alto previo al overhaul.
LP101B	25.000 h	3,65	51,82%	40,24% (pre-overhaul)	< umbral	102 totales	Preparar segunda intervención en mediano plazo.
LP101C	28.900 h	8,48	34,12%	30,65%	> umbral	358 totales	Caso crítico; priorizar ventana de mantenimiento.

Tabla 3-10 Comparativa de rack de bombas.

La comparación entre los tres activos pone de manifiesto la capacidad del índice de salud y Weibull ajustada para discriminar el nivel de riesgo técnico en función del deterioro acumulado, permitiendo anticipar condiciones críticas y priorizar intervenciones preventivas de manera fundamentada.

Con base en los resultados, se recomienda para la LP101C implementar una ventana de mantenimiento mayor en el próximo periodo trimestral T2 del 2025, continuo monitoreo de condición y preparación de recursos. Además, las curvas de los índices de salud y confiabilidad de las bombas evaluadas muestran una relación inversa consistente: a medida que el índice de salud (HI) se incrementa, se refleja un mayor deterioro y, por ende, la confiabilidad proyectada $R(t)$ disminuye de forma acelerada, especialmente al cruzar los umbrales de alerta y criticidad definidos por la metodología. No obstante, esta relación no es **estrictamente lineal**, sino que obedece a la parametrización específica adoptada para el cálculo del HI y la función de confiabilidad. En consecuencia, aunque es imposible estimar el nivel de confiabilidad a partir del índice de salud, especialmente en los extremos de la escala, las decisiones críticas deben sustentarse en el análisis combinado de ambas métricas y la validación empírica de su correspondencia.

He aquí un ejemplo visual (gráfico 3-6) que nos da una idea de cómo podemos afrontar estos índices en la gestión del mantenimiento.

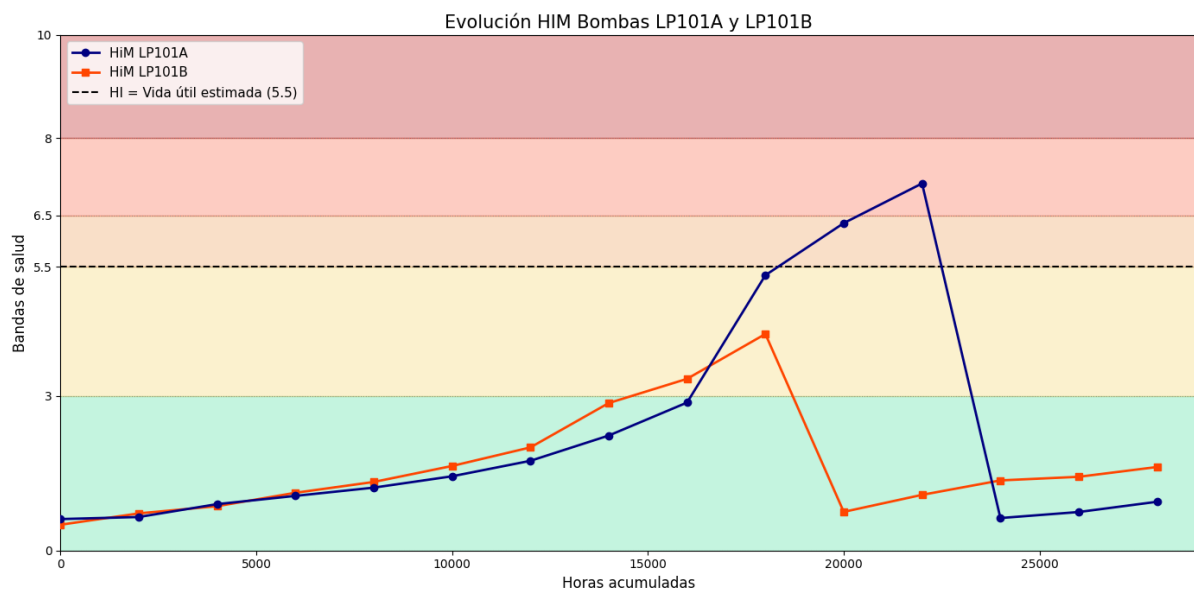


Gráfico 3-6 HIM LP A y B, reinicio de indicadores.

El análisis comparativo resalta la importancia de monitorear no solo el valor absoluto del índice de salud, sino también su **tendencia** y respuesta a las acciones preventivas/correctivas. Las mejores prácticas internacionales señalan que la gestión del mantenimiento basada en la condición y el análisis de tendencias facilita la intervención antes de alcanzar estados críticos de deterioro. Esto se evidencia en el caso de la LP101B, donde una intervención anticipada en el rango aceptable del índice redujo la tendencia de aumento a un estado “casi nuevo” lo que no significa que haya sido una buena decisión cuando pudo haber estado en servicio más horas sin sufrir riesgos operacionales. No así

para la LP101A, en donde la intervención se postergo a diferencia del “overhaul” de la LP101B, incrementando los riesgos de falla.

Ante un incremento significativo en los índices, la toma de decisiones debe sustentarse en criterios objetivos y un análisis situacional detallado, verificando la causa del aumento y evaluando la posibilidad de mitigar tal condición. Si el índice se estabiliza tras la intervención y la confiabilidad permanece en valores óptimos, el activo podría mantenerse bajo monitoreo; de lo contrario, se debe priorizar un mantenimiento mayor. La gestión moderna enfatiza la importancia de actuar según la evolución dinámica de los índices de salud, priorizando intervenciones en zonas de alerta y reforzando el monitoreo y la calidad de los datos para anticiparse al cruce de umbrales críticos.

3.3 CASO ESCENARIO, ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD E ÍNDICE DE SALUD PARA LAS BOMBAS CRIOGÉNICAS

Bajo el sistema de descarga compuesto por el rack de bombas criogénicas, se logra evidenciar que, si bien son activos de similares características en ubicación y funcionalidad, pueden presentar distintos ciclos de operación hasta la falla e índices de salud dados por la condición de cada activo. Es decir, que más allá de una ubicación estática percibida por históricos de falla de un activo que establecen un nivel de criticidad, se puede gestionar desde una visión holística cuan más información se posea. En las figuras 3-3 y 4 se presentan tiempos de operación respectivos a las bombas LP101B y LP101A, se derivan valores de escala y forma, gracias a estos valores podremos definir a que escenario corresponde bajo la tabla 2-8 y poder analizar más a fondo la actualidad de estos activos. Bomba LP101B 1050, 1388, 2018, 2780, 3083, 3905, 5609, 6132, 6544, 8984, 10899, 11206, 11806, 17403, 20506, 22023, 23737, 27332, 28060, 32588, 34583...

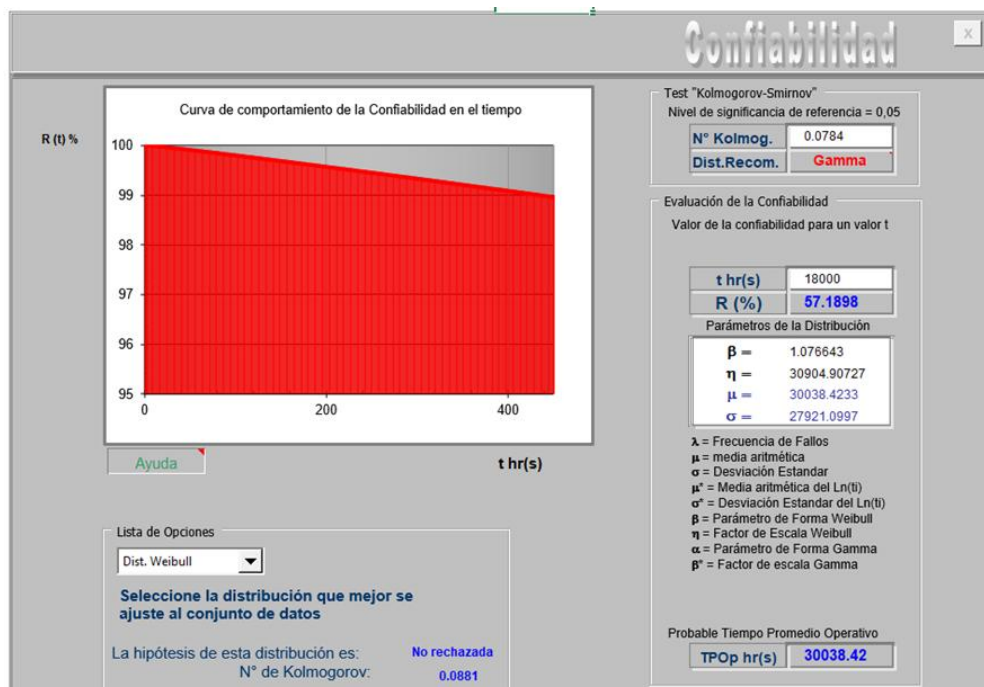


Figura 3-3 Parámetro de forma ($\beta \sim 1$) LP101B

Bomba LP101A 237, 666, 3265, 3266, 4029, 4078, 4590, 5005, 7947, 7910, 8446, 11250, 11652, 143800, 14713, 16137, 19967, 20727, 23737, 26207, 26772, 26997, 28006, 38909... hr

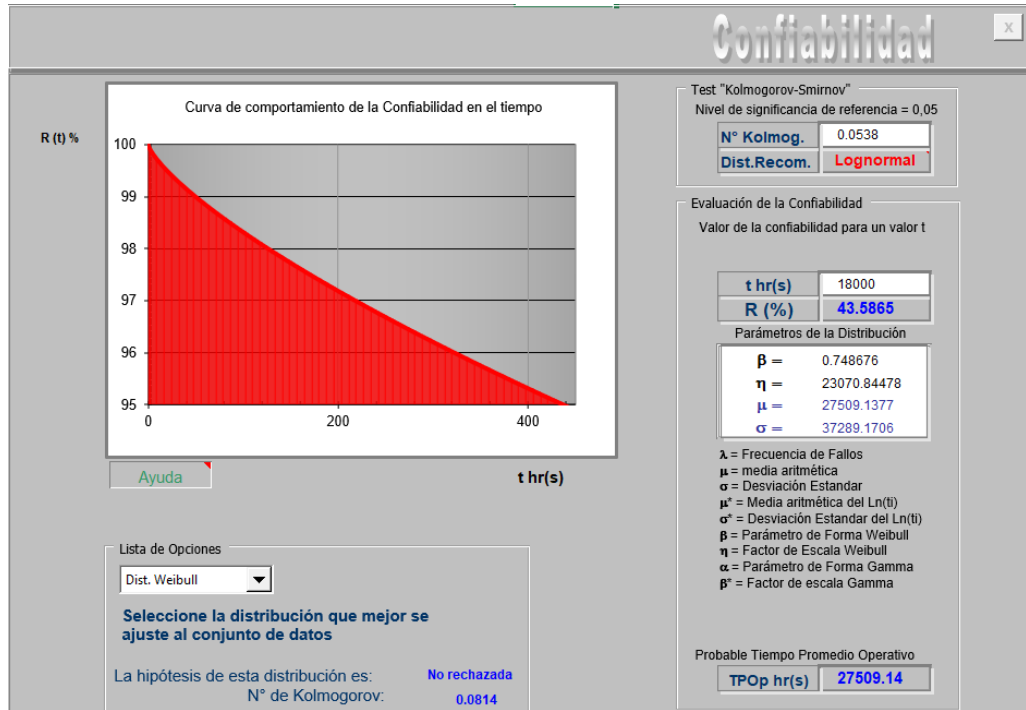


Figura 3-4 Parámetro de forma ($\beta < 1$) LP101A.

La tabla 2-8 (véase capítulo 2) presenta las 27 combinaciones posibles entre índice de salud (HI), criticidad y patrón de desgaste (β). En este apartado se aplica esa taxonomía al sistema de bombas criogénicas de descarga -LP101A, LP101B, LP101C- cuya criticidad es alta en la matriz de la figura 1-5 (véase capítulo 1). Cada bomba exhibe una condición de salud (HI) y un patrón de desgaste distinto, lo que obliga a diferenciar la estrategia de mantenimiento pese a compartir la misma consecuencia de fallo. Se ilustra la siguiente tabla 3-11.

Bomba	HI calculado	Criticidad	Patrón Weibull	Escenario posible
LP-101A	Intermedio	Alto	$\beta < 1$	Escenario 16
LP-101B	Óptimo	Alto	$\beta \approx 1$	Escenario 8
LP-101C	Crítico	Alto	$\beta > 1$	Escenario 27

Tabla 3-11 Escenario respectivo a cada bomba.

Para la bomba LP101A – escenario 16 – se denota una curva de fallas decreciente típicamente asociada a defectos de fabricación, ensamblaje o instalación que se manifiestan en las primeras horas de servicio. Al ubicarse en un HI intermedio, la bomba aún no alcanza la zona crítica, pero la probabilidad de fallas de “mortalidad infantil” sigue siendo relevante. ¿Cómo se puede gestionar desde este escenario?

- 1) Programar una fase de prueba intensiva “*burn-in*” controlada durante la próxima ventana operativa para precipitar fallas latentes y mitigarlas antes de una operación plena, pues es una práctica recomendada para $\beta < 1$.
- 2) Tras cada evento de falla se debe alimentar un análisis causa raíz (RCA) para cerrar definitivamente los modos de falla tempranos.

Para la bomba LP101B – Escenario 8 – el parámetro implica una tasa de fallas prácticamente constante; los eventos son en gran medida aleatorios y no dependen de la edad del activo. Con un HI óptimo, la probabilidad base de falla es baja, pero cualquier parada impactaría directamente en la próxima puesta en marcha. *¿Cómo se puede gestionar desde este escenario?*

- 1) Aplicar una estrategia de mantenimiento basada en condición, donde exista un monitoreo por sensores de magnitudes consideradas como agentes de deterioro con el fin de alertar desviaciones súbitas que precedan una posible falla.
- 2) Aprovechar mantenimientos programados de otras bombas (mantenimiento oportunista) para intervenir el activo, estrategia demostrada efectiva en equipos de alta criticidad con fallas aleatorias (E. Dong, Z. Cheng, 2022).
- 3) Mantener un repuesto en *stand by* y un procedimiento de cambio rápido que limite el tiempo fuera de servicio a un turno laboral.

Para la bomba LP101C – Escenario 27 – el patrón de desgaste revela un aumento exponencial, la clásica curva “fin de vida”. Con un HI Crítico, la bomba se encuentra en una condición de riesgo inaceptable donde la probabilidad de falla es alta y los costos asociados ya parecen un hecho, este parece ser el escenario más crítico. *¿Cómo se puede gestionar desde este escenario?*

- 1) Aplicar un análisis de ciclo de vida que incorpore la proyección del HI para comparar “overhaul” versus un reemplazo; estudios demuestran que incluir el AHI mejora la precisión del LCC en activos críticos (O. Durán, 2020).
- 2) Programar la intervención mayor en la próxima parada o renovar si el costo anual equivalente supera el 80% del equipo nuevo, conforme a prácticas de ingeniería de confiabilidad (De la Fuente A. Crespo A, 2019)
- 3) Monitoreo intensivo mientras llega la fecha de intervención, ejecutar inspección diaria y habilitar disparos automáticos para evitar fallas funcionales.

3.4 IMPACTO ECONÓMICO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

En la tabla 3-12 se compara, en un horizonte de 17 años, los costos asociados a dos estrategias de gestión para el escenario más crítico (LP101C): un mantenimiento correctivo y preventivo tradicional (Estrategia 1), un programa predictivo soportado en Asset Health Index (Estrategia 2) y un mantenimiento reforzado preventivo con repuestos críticos en stock (Estrategia 3) . Los costos por mantenimientos se despliegan en el capítulo 1.

En la Estrategia 1 – Con AHI, el OPEX acumulado asciende a \$122,400 US, distribuidos en mantenimiento preventivo. A estos gastos operacionales se les suma los costos de inversión CAPEX de \$231,000 US entre “overhauls” en base a condición de salud e implementación de AHI, tecnología de monitoreo y mantenimiento de softwares. Es importante mencionar que algunos costos no corresponden a un activo individual, por ejemplo, los costos de licencia y sistema pueden ratear muchos mas activos, sin embargo, se toma en cuenta un valor total y para la evaluación económica los costos serán ajustados a costo por activo.

En la Estrategia 2 – Sin AHI el OPEX acumulado asciende a USD 417,900, distribuidos en mantenimientos preventivos, correctivos y de no producción, por otro lado, los valores de inversión CAPEX USD 180,000 son menores a la EST1 debido a menor cantidad de overhaul y costo de reemplazo de la bomba.

En la Estrategia 3 – Se refuerza el plan de mantenimiento de la bomba intensificando en mantenimiento preventivo en un 30% respecto a EST1, se reducen los correctivos en un 30% mediante pruebas funcionales y condiciones ligeras de operación, se reducen los costos de no producción en un 40% por disponibilidad de stock crítico con un CAPEX de USD 40,000 en 2025. Eso suma un CAPEX de USD 240,000 y OPEX de USD 365,970.

Ítem	Costo	Desembolso (US\$)
Sensores on-line (10 × triax + gateways)	CAPEX	USD 45,000
Instalación y puesta en marcha	CAPEX	USD 18,000
Licencia anual APM/CMMS-AHI (17 años)	OPEX	USD 12,000
Hosting y mantenimiento de sensores	OPEX	USD 5,000
Capacitación inicial (8 técnicos)	CAPEX	USD 10,000
Servicios de integración/consultoría AHI	CAPEX	USD 12,000
CAPEX (Año 0)		USD 85,000
OPEX		USD 17,000

Tabla 3-12 Costos implementación CBM+AHI, 2025 (gama de 6 activos).

La implementación del AHI bajo un horizonte de 17 años tiene un coste de US \$353,400 que, al habilitar intervenciones predictivas, eliminaría por completo los costes correctivos por fallas súbitas y dando un escenario de alargamiento de vida útil por un monitoreo saludable de los equipos, por lo tanto, postergando costos CAPEX de reemplazo o reacondicionamiento en el horizonte de análisis.

El análisis revela un ahorro de US \$172,570 respecto a la estrategia 3, la cual es más económica que la estrategia 1. Se reduce en un 40,9% en costos operacionales y de capital de activos al adoptar un monitoreo continuo frente a la estrategia 1 actual. Ahora si aplicamos una tasa de descuento de 15% se calculan métricas VAN y TIR (tabla 3-13).

Nº	Equipo	Estrategia	Capex/Opex	Item	Total
1	300-PM-101C	Con AHI	Opex	CMP	\$122.400
			Opex	CMC	\$0
			Capex	CMM	\$90.000
			Opex	C.N.Prod	\$0
			Capex	Impl.AHI	\$141.000
			Capex	C.Reacon	\$0
				Total	\$353.400
				VAN	\$198.923
				tasa ®	15%

Nº	Equipo	Estrategia	Capex/Opex	Item	Total
2	300-PM-101C	Sin AHI	Opex	CMP	\$122.400
			Opex	CMC	\$33.000
			Capex	CMM	\$60.000
			Opex	C.N.Prod	\$262.500
			Capex	C.Reacon	\$120.000
				Total	\$597.900
				VAN	\$200.932
				tasa ®	15%

Nº	Equipo	Estrategia	Capex/Opex	Item	Total
3	300-PM-101C	Refuerzo de mantenimiento prev, stock repuestos criticos	Opex	CMP	\$159.120
			Opex	CMC	\$23.100
			Capex	CMM	\$40.000
			Opex	C.N.Prod	\$183.750
			Capex	C.Reacon	\$120.000
				Total	\$525.970
				VAN	\$188.351
				tasa ®	15%

Tabla 3-13 Extracto impacto económico LP101C, 17 años.

Estrategia	VAN	TIR	Costo total
EST 1	\$ 198.923		\$ 353.400
EST 2	\$ 200.932		\$ 597.400
EST1 VS EST2	\$ -2.009	15%	\$ 244.000

Estrategia	VAN	TIR	Costo total
EST 2	\$ 200.932		\$ 597.400
EST 3	\$ 188.351		\$ 525.970
EST2 VS EST3	\$ 12.581	26%	\$ 71.430

Estrategia	VAN	TIR	Costo total
EST 1	\$ 198.923		\$ 353.400
EST 3	\$ 188.351		\$ 525.970
EST1 VS EST 3	\$ 10.572	13%	\$ 172.570

Tabla 3-14 Métricas financieras impl. AHI.

A la tasa de descuento base del 15% (VAN de costos: menor es mejor), el ranking económico es claro, la EST3 presenta un VAN de USD 198,923, seguido de EST1 de USD 198,923 y EST2 de USD 200,932. Aunque el costo total no descontando de EST1 (USD 353,400) es inferior al de EST (USD 525,970), la distribución temporal de los desembolsos favorece a EST3 ya que pospone mas gastos hacia los años futuro, y a una tasa de 15% ese traslado en el tiempo se premia, por lo que su costo presente termina siendo menor.

La comparación EST1 vs EST2 arroja una diferencia de VAN -USD 2,009 lo que significa que EST1 es levemente mejor que EST2. La TIR incremental de 15% es la tasa de cruce entre ambas: por debajo de 15% la ventaja de EST1 se amplía, y al revés cuando la tasa >15%.

Para EST2 vs EST3, la diferencia de VAN es USD 12,581, de modo que a 15% de tasa EST3 es categóricamente mejor que EST2. La TIR es de 26% e indica que con tasas de descuento superiores a esta la preferencia podría cambiar a EST2.

La comparación entre EST1 vs EST3, la diferencia de VAN es USD 10,572, por lo que a 15% EST3 supera a EST1. Aquí, la TIR es de 13%, si la tasa efectiva de la empresa cayera por debajo de este porcentaje, la EST1 pasaría a ser la preferible

Consolidando las tres comparaciones, la frontera de decisión depende de las tasas < 13% para que la EST1 sea la preferencial. Entre 13% y 26% conviene la EST3 y las tasas mayores a 26% conviene la EST2. Dado que el caso de estudio utiliza un 15% de tasa de descuento da preferencia a la Estrategia 3.

Esto muestra que la decisión es sensible al costo de capital y al peso de no producir; a tasas bajas o cuando el CAPEX AHI se optimiza, la ventaja de AHI crece, pero si el costo

de capital es muy alto o los eventos de no producción son poco relevantes, la conveniencia se reduce.

Si bien el análisis económico respalda la decisión en ciertos escenarios, la implementación también genera beneficios no capturados completamente por VAN/TIR. A continuación, se sintetiza el valor cualitativo esperado y la evidencia reciente de la literatura.

Un análisis cualitativo del valor aportado de la implementación es una mayor disponibilidad. La literatura reporta aumentos de 10-15% en disponibilidad tras instalar monitoreo en línea (Siemens AG 2023). El AHI genera un ranking de activos que optimiza CAPEX/OPEX y respalda el cumplimiento regulatorio sobre la evaluación de riesgos asociados con cualquier cambio planificado antes de su implementación (ISO 55001:2014).

En la literatura reciente, distintos autores han aplicado índices de salud de activos a flotas de equipos críticos, obteniendo conclusiones que guardan estrecha relación; Gonzalez-Prida et.al (2025) desarrollan un AHI genérico aplicable a distintas clases de equipos e industrias demostrando que un índice consolidado permite identificar con objetividad candidatos tanto para extensión de vida útil como para reemplazos tempranos. Por otro lado, Crespo del Castillo et, al (2023) propone un AHI “Data-driven” para terminales portuarias (quay cranes), combinando modificadores de salud, operación y confiabilidad en tiempo real; hallan que un AHI superior al umbral 7.5 predice con un 85% de acierto una parada no programada en las siguientes 200 horas de operación.

3.5 **LIMITACIONES DE LA METODOLOGÍA Y PROYECCIONES**

La aplicación del AHI a bombas criogénicas y, en general, a activos de alta exigencia operativa exige reconocer los límites metodológicos. El marco original fue concebido para activos eléctricos; al trasladarlo a equipos centrífugos en servicio criogénico, la relación entre índice de salud y probabilidad de falla, la definición de modificadores y los límites de puntuación requieren una calibración local. Si esos parámetros se adoptan sin ajuste, el modelo puede sobreestimar la PoF y distorsionar la priorización.

También hay desafíos de calibración y datos, estimación de parámetros con históricos acotados y eventos poco frecuentes. Otro punto crítico es evitar el doble conteo entre modificadores. El factor de carga ajusta la vida esperada, mientras que la carga operativa debería actuar como desviación temporal; la condición observada/medida y la confiabilidad histórica aportan señales distintas. Si estos valores se mezclan o se parametrizan mal, la severidad operativa queda sobrerrepresentada.

Finalmente, los supuestos económicos condicionan la conveniencia: tasas de descuento, horizonte, recursos, costos de mantenimiento y operación y de no producción.

Con esos límites claros, la proyección a otros equipos se apoya en un despliegue por familias, manteniendo la lógica de la metodología calibrada a cada contexto. Un primer ciclo prioriza activos de alta criticidad (Compresores BOG, bombas de agua de mar, HVAC Críticos, etc). Para cada familia, se levanta un FMECA y se mapean los modos de falla como modificadores de salud y se construye la curva local PoF-Hi. El paso siguiente es establecer umbrales por bandas de salud y por tendencia de probabilidad de falla, vinculando automáticamente la emisión de OT en el sistema de gestión de mantenimiento y cerrando el ciclo con indicadores de disponibilidad, MTBF, porcentaje de OT planificadas.

3.6 **DISCUSIONES FINALES**

En síntesis, la aplicación de la metodología AHI bajo el enfoque DNO 2021 v2.1, complementada con herramientas de análisis de confiabilidad y riesgo, ha demostrado ser una estrategia robusta para la **priorización dinámica de activos y la evaluación comparativa del riesgo técnico en poblaciones de equipos críticos** (DNO,2021). Los resultados obtenidos en el caso de las bombas criogénicas sumergidas evidencian la capacidad del modelo para discriminar niveles de deterioro, vincular tendencias de condición operacional con probabilidad de falla y soportar la toma de decisiones desde una perspectiva basada en la evidencia (Tiddens, 2018).

Si bien la metodología no fue diseñada como una herramienta predictiva para la detección temprana de fallas individuales, su aplicación integrada con sistemas de monitoreo por condición puede contribuir indirectamente a la identificación de activos en riesgo y a la optimización de las intervenciones de mantenimiento.

No obstante, es fundamental reconocer las limitaciones inherentes a la metodología, especialmente en lo relativo a la dependencia de la calidad y completitud de los datos, la subjetividad en la parametrización de modificadores y la menor eficacia ante modos de falla súbita o no detectable mediante variables monitoreadas. Asimismo, los desafíos organizacionales para la integración del sistema y el riesgo de desplazar el juicio experto por decisiones automáticas representan factores que deben ser gestionadas activamente para asegurar el éxito sostenido de la estrategia.

En consecuencia, la metodología, constituye un valioso complemento a la gestión tradicional de activos y criticidad, siempre que su aplicación se sustente en una validación empírica periódica, la capacitación continua del personal y una cultura organizacional orientada al aprendizaje y a la mejora. Los beneficios potenciales en reducción de riesgo, optimización de costos y maximización de la disponibilidad justifican su adopción, pero su efectividad dependerá de la madurez del entorno y la integración armónica entre tecnología, datos y experiencia operativa.

3.7 **CONCLUSIÓN**

A una tasa de descuento de 15%, el análisis económico ubica a EST3 como una alternativa de menor costo presente con VAN de USD 188,351, superando levemente a EST1 con USD 198,923. Sin embargo, la TIR de ajuste delimita con claridad que bajo una tasa menor a 13% los resultados económicos favorecerían a la estrategia con implementación de índice de salud.

En el rack de bombas, la LP101A alcanzó valores críticos de HIM >8 antes del overhaul, con una confiabilidad de 30,6% en su punto más exigente; en contraste la LP101B se mantiene en Banda HI3 tras 25000 horas de servicio. Para la LP101C se registran 28900 horas acumuladas, con un HIM de 8.48 (Banda HI5) y una probabilidad de falla de 66,2. Se recomienda una ventana de mantenimiento mayor en T1-2025 con monitoreo continuo. Estas curvas R(t) con C(t) muestran como el deterioro real acelera la caída de confiabilidad respecto al modelo base, validando el aporte del AHI para priorización de decisiones.

En activos de alta criticidad como bombas criogénicas, la evolución desde esquemas correctivos/preventivos hacia modelos predictivos basados en datos representa un avance tangible en eficiencia operativa y sostenibilidad económica. Con base en los resultados y la sensibilidad reportada.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Abichou, B., Voisin, A., Iung, B., Van, P. D., & Kosayyer, N. (2012). Choquet integral capacities-based data fusion for system health monitoring. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(20), 31-36. <https://doi.org/10.3182/20120829-3-mx-2028.00260>.
- 2) Crespo Del Castillo, A., Sasidharan, M., Nentwich, C., Merino, J., & Kumar Parlikad, A. (2023). Data-Driven Asset Health Index – an application to evaluate Quay Cranes in container ports. *Maritime Policy & Management*, 51(8), 1805–1823. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2231449>
- 3) De la Fuente, A., Crespo, A., Sola, A., Guillén, A., Gómez, J., Amadi-Echendu, J.E., 2021a. Planning major overhaul and equipment renovation based on asset criticality and health index. In: Crespo Márquez, A., Komljenovic, D., Amadi-Echendu, J. (Eds.), 14th WCEAM Proceedings. WCEAM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering., http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_8, Springer, Cham.
- 4) Durán, O., Orellana, F., Perez, P., & Hidalgo, T. (2020). Incorporating an Asset Health Index into a Life Cycle Costing: A Proposition and Study Case. *Mathematics*, 8(10), 1787. <https://doi.org/10.3390/math8101787>
- 5) Enzhi Dong, Tielu Gao, Zhonghua Cheng, “Opportunistic Maintenance Strategy for Complex Equipment with a Genetic Algorithm Considering Failure Dependence: A Two-Dimensional Warranty Perspective”, *Sensors* 2022. <https://doi.org/10.3390/s22186801>
- 6) Gonzalez-Prida (2023). Strategic view of an assets health index for making long-term decisions in different industries. June 2018. Haugen, S., Barros, A., Van Gulijk, C., Kongsvik, T., & Vinnem, J. E. (2018). Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9781351174664>
- 7) International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60812:2018 - Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) (3rd ed.). IEC. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/2e319527-8261-48f6-9427-b846ad5de032/iec-60812-2018>.



- 15) Siemens AG. (2023). Maximising your ROI with scalable, predictive maintenance: Senseye Predictive Maintenance ROI Report V3. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:854533af-0f63-46d2-8534-324cf0bbb161>.

- 16) Tiddens, W. W. (2018). *Setting sail towards predictive maintenance: developing tools to conquer difficulties in the implementation of maintenance analytics*. [PhD Thesis - Research UT, graduation UT, University of Twente]. University of Twente. <https://doi.org/10.3990/1.9789036546034>

- 17) Distribution Network Operators Working Group. (2021). DNO Common Network Asset Indices Methodology (Version 2.1). Office of Gas and Electricity Markets (Ofgem). https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2021/04/dno_common_network_asset_indices_methodology_v2.1_final_01-04-2021.

- 18) Woodhouse, John. (2003). Asset management: A science emerging. 6. 4-10. Woodhouse, https://www.researchgate.net/publication/298601892_Asset_management_A_science_emerging.

ANEXOS

Periodos: (Año/trimestre)	Modificadores de Salud						Modificador de Fiabilidad		Carga Real	MIS	MF	MC	HI Real	Hi M
	Caudal	Carga	Tasp	Nivel tanque GNL	Vibraciones	Nº partidas	% Inactividad	Grandes mantenimientos						
2018	T1	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.87	1.265	1	1.01	2.73	3.50
	T2	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.86	1.265	1	1.00	3.18	4.00
	T3	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.87	1.265	1	1.01	3.70	4.71
	T4	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.86	1.265	1	1.00	3.96	5.03
2019	T1	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.86	1.265	1	1.00	3.98	5.03
	T2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.87	1.100	1	1.01	4.05	4.51
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.87	1.100	1	1.01	4.25	4.70
	T4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.88	1.100	1.1	1.02	4.38	5.41
2020	T1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.88	1.100	1	1.03	4.56	5.15
	T2	1.00	1.00	1.30	1.00	1.10	1.1	1	0.93	1.573	1	1.08	4.62	7.84
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.88	1.100	1	1.03	4.65	5.25
	T4	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.88	1.265	1	1.03	4.85	6.30
2021	T1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1.05	0.88	1.100	1	1.02	4.99	5.87
	T2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.88	1.100	1	1.02	5.21	5.85
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10	1.1	1	0.86	1.210	1	1.00	5.37	6.47
	T4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1.05	0.86	1.100	1.05	1.00	5.42	6.24
2022	T1	1.00	1.00	1.30	1.00	1.00	1.1	1.1	0.86	1.430	1	1.00	5.58	8.73
	T2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1.1	0.86	1.200	1.1	1.00	5.63	7.40
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1.1	0.86	1.200	1.1	1.00	5.73	7.52
	T4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1.1	0.86	1.200	1.1	1.00	5.75	7.56
2023	T1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1.1	0.86	1.200	1.1	1.00	6.09	7.99
	T2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10	1.1	1.1	0.86	1.210	1.1	1.00	6.38	8.46
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10	1.1	1.1	0.88	1.210	1.1	1.02	6.57	8.92
	T4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.88	1.100	1.1	1.02	6.63	8.18
2024	T1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1	0.86	1.200	1	1.00	6.72	8.02
	T2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1	0.86	1.200	1	1.00	7.06	8.44
	T3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.2	1	0.86	1.200	1	1.00	7.10	8.48
	T4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.1	1	0.86	1.100	1	1.00	7.36	8.06

Subsystem 2: LNG Storage and LP Send-out

Reference: 151729-000-PR-PF-0002-1

Date: 25.06.2014

Revision:0

Components	Failure Modes/ Causes	Failure Mode Frequency (year)	Failure Mode Repair Time - A (L)	Effects	Comments
Early Gas Storage Tank (200-T-301)	LNG leakage on the top of the tank (Bridement carbon steel)	1/100 years	1 year	No impact in send-out	O4) Early Gas Storage Tank operates only for additional storage with the capacity of 10.000 M3.
In-Tank Pumps (300-P-101 A/B/C, 201 A/B/C) - 6x33%	Short repair	2 events in 6 pumps /year	6 to 8 h	Loss of redundancy / reliability. Impact if there are 4 or more failures	R2) Use the early gas in tank pumps as spare for other LP pumps to increase the send-out availability of LNG. O5) It is possible to keep 10MM send-out with the 200-T-301 for 12h, if it is full.
	Large repair	1 event in 6 pumps / 5 years	- 12 hrs to inertizate - 15 hrs to replace pump - 70 to repair - 12 to install - 15 to start source: GILGNL	Loss of redundancy / reliability. Impact if there are 4 or more failures	
	Electrical failure - cables	2 events in 6 pumps / year	8h	Loss of redundancy / reliability. Impact if there are 4 or more failures	
	Motor failure	1 event / 6 years (GNLQ estimative)	- 12 hrs to inertizate - 15 hrs to replace pump - 72 to repair - 12 to install	Loss of redundancy / reliability. Impact if there are 4 or more failures	



Estrategia	Capex/Opex	Item	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	Total
Retienero de mantenimiento prev. stock repuestos criticos	Capex	CMP	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$159.120
	Opex	CMC	\$0	\$0	\$0	\$0	\$7.700	\$0	\$0	\$0	\$7.700	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$7.700	\$0	\$23.100
	Opex	CMMD	\$40.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$40.000
	Opex	C.N.Prod	\$0	\$0	\$0	\$0	\$61.250	\$0	\$0	\$0	\$61.250	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$61.250	\$0	\$183.750
	Capex	C.Reacon	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$120.000
Total			\$49.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$78.310	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$78.310	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$9.360	\$255.970
VAN			\$188.351																	

Estrategia	Capex/Opex	Item	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	Total
Sin AHI	Opex	CMP	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$122.400
	Opex	CMC	\$0	\$0	\$0	\$0	\$11.000	\$0	\$0	\$0	\$11.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$11.000	\$0	\$33.000
	Capex	CMMD	\$30.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$30.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$60.000
	Opex	C.N.Prod	\$0	\$0	\$0	\$0	\$87.500	\$0	\$0	\$0	\$87.500	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$87.500	\$0	\$262.500
	Capex	C.Reacon	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$120.000
Total			\$37.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$105.700	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$105.700	\$7.200	\$37.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$597.900
VAN			\$200.932																	
tasas ®			15%																	

Estrategia	Capex/Opex	Item	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	Total
Con AHI	Opex	CMP	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$7.200	\$122.400
	Opex	CMC	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
	Capex	CMMD	\$30.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$30.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$90.000
	Opex	C.N.Prod	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
	Capex	Impl.AHI	\$85.000	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$3.500	\$141.000
Capex	C.Reacon	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Total			\$122.200	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$40.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$10.700	\$353.400
VAN			\$198.923																	
tasas ®			15%																	

In-Tank Pump	300-P-101 A/B/C		Short repair	1.00	6	8				3.00	6.0		8.0		FMEA-2014
In-Tank Pump	300-P-101 A/B/C		Large repair	6.00	126					30.00		124.0			FMEA-2014
In-Tank Pump	300-P-101 A/B/C		Electrical failure - cables	0.50	1			124		3.00		8.0			FMEA-2014
In-Tank Pump	300-P-101 A/B/C		Motor failure	6.00	124					6.00		126.0			FMEA-2014
In-Tank Pump	300-P-201 A/B/C	6x33% for tanks	Short repair	1.00	6	8				3.00	6.0		8.0		FMEA-2014
In-Tank Pump	300-P-201 A/B/C	200-T-101/201	Large repair	6.00	126					30.00		124.0			FMEA-2014
In-Tank Pump	300-P-201 A/B/C	& 2x33% for	Electrical failure - cables	0.50	1			124		3.00		8.0			FMEA-2014