

"DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE COSTO DE CICLO DE VIDA PARA UN COMPRESOR INCORPORANDO ASPECTOS DE SALUD DE ACTIVOS"

Pablo Pérez Guzmán

Ingeniero Civil Mecánico

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Profesor Guía: Sr. Orlando Durán Acevedo

Profesor Co-Guía: Sr. Fabián Orellana Zamorano

RESUMEN

Objetivo: Diseñar una metodología de cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida que incorpore aspectos de Salud de Activos, con el objetivo de relacionar el deterioro del activo con su tasa de fallas.

Metodología: En este estudio se propuso una metodología matemática que permite calcular los costos por Confiabilidad de un activo, relacionando su tasa de fallas obtenida según un modelo de distribución probabilística, con la cantidad de deterioro o desgaste en el tiempo, cuantificado por su Índice de Salud.

Resultados: Como resultado de la aplicación de la metodología propuesta al caso de estudio, se demostró que el modelo es capaz de reflejar distintos escenarios diseñados para comparar y analizar el impacto del factor Confiabilidad en los costos de la vida de un activo.

Conclusiones: La metodología propuesta en este estudio puede ser una adecuada aproximación de cálculo de costos dado que a diferencia de otros métodos tradicionales de Análisis de Costo de Ciclo de Vida esta considera aspectos importantes que pueden afectar a la tasa de fallas de un activo, tales como, la tendencia de la tasa de fallas en el tiempo, la operación, el deterioro, como también factores externos.

Palabras clave: análisis de costo de ciclo de vida; índice de salud de activos; confiabilidad; tasa de fallas; distribución de weibull; costos por fallas; tiempo hasta la falla.

ABSTRACT

Objective: Design a calculation methodology for Life Cycle Cost Analisys that incorporates aspects of Asset Health, with the objective of relating the deterioration of the asset to it's failure rate.

Method: In this study, a mathematical methodology was proposed that allows calculating the Reliability costs of an asset, relating its failure rate obtained according to a probability distribution model, with the amount of deterioration or wear over time, quantified by its Health Index.

Results: As a result of applying the proposed methodology to the case study, it was shown that the model is capable of reflecting different scenarios designed to compare and analyze the impact of the Reliability factor on the costs of the life cycle of an asset.

Conclusions: The methodology proposed in this study can be an adequate approximation of cost calculation since, unlike other traditional Life Cycle Cost Analysis methods, this considers important aspects that can affect the failure rate of an asset, such as, the trend of the failure rate over time, the operation, the deterioration, as well as external factors.

Words: life cycle cost analysis; asset health index; reliability; failure rate; weibull distribution; failure costs: time to failure.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTR	ODUCCIÓN 1 -
	1.1	Objetivos 3 -
	1.1.1	Objetivo General 3 -
	1.1.2	Objetivos Específicos3 -
	1.2	Descripción del Problema4 -
	1.3	Contexto5 -
2	MAR	CO TEÓRICO 6 -
	2.1	Indicadores básicos del Análisis Estadístico de Confiabilidad 6 -
	2.1.1	Modelo Probabilístico según Distribución de Weibull 6 -
	2.1.2	Indicadores de Confiabilidad de la Distribución de Weibull8 -
	2.2	Análisis de Costo de Ciclo de Vida9 -
	2.2.1	Modelo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida (cálculo de costos por
	Confi	abilidad según modelo de Weibull)11 -
	2.2.2	Ecuaciones de Cálculo de equivalencia del Valor del dinero en el tiempo 12 -
	2.2.3	Cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida13 -
	2.3	Índice de Salud de Activos 14 -
	2.3.1	Metodología de Cálculo del Índice de Salud de Activos 16 -
	2.3.2	Vida Normal Estimada16 -
	2.3.3	Vida Estimada 17 -
	2.3.4	Tasa de Envejecimiento 19 -
	2.3.5	Índice de Salud Actual Inicial 20 -
	2.3.6	Índice de Salud Actual21 -
3	DESA	ARROLLO DEL MODELO
	3.1	Paso 1: Cálculo del Factor de corrección de la Salud 27 -
	3.2	Paso 2: Cálculo de λ corregido29 -
	3.3	Paso 3: Cálculo de Fallas Anual 31 -

	3.4	Paso 4: Calculo de Costos Totales por Fallas CTPF (P)	32 -
	3.5	Paso 5: Corrección del término Costos totales por fallas	33 -
	3.6	Paso 6: Ecuación de Análisis de Costo de Ciclo de Vida corregida	34 -
4	ESTU	DIO DE CASO: Compresor de BOG, Burckhardt Laby 2DL250B	36 -
	4.1	Introducción	36 -
	4.2	Diseño y función del Compresor	38 -
	4.3	Cálculo del Índice de Salud de Activos	41 -
	4.3.1	Vida Normal Estimada	41 -
	4.3.2	Vida Estimada	41 -
	4.3.3	Tasa de Envejecimiento	42 -
	4.3.4	Índice de Salud Actual Inicial	43 -
	4.3.5	Índice de Salud Actual	44 -
	4.3.6	Cálculo de la Tasa de Fallas corregida	48 -
	4.4	Aplicación del Modelo	52 -
	4.4.1	Introducción	52 -
	4.4.2	Hipótesis 1: Caso Teórico	53 -
	4.4.3	Hipótesis 2: Overhaul Económico	54 -
	4.4.4	Hipótesis 3: Criterio de overhaul HI=5,5	55 -
	4.4.5	Hipótesis 4: Criterio de overhaul HI=4,0	56 -
	4.4.6	Hipótesis 5: Criterio de overhaul HI=5,5 y Overhaul Económico	58 -
	4.4.7	Hipótesis 6: Criterio de overhaul HI=4,0 y Overhaul Económico	59 -
	4.4.8	Análisis de los Resultados	61 -
5	COM	PARACIÓN CON UN MODELO TRADICIONAL DE LCC	63 -
	5.1	Introducción	63 -
	5.2	Comparación de los resultados obtenidos	64 -
6	CONC	CLUSIONES	66 -
7	BIBL	IOGRAFÍA	71 -

8	ANEX	KOS	72 -
	8.1	Flujo de Caja: Compresor Holding A, Modelo Tradicional	72 -
	8.2	Flujo de Caja: Compresor Holding A. Caso Teórico	72 -
	8.3	Flujo de Caja: Compresor Holding A. Overhaul Económico	73 -
	8.4	Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI = 5,5	73 -
	8.5	Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI = 4,0	74 -
	8.6	Flujo de Caja: Compresor Holding A. Overhaul Económico y HI = 5,5	74 -
	8.7	Flujo de Caja: Compresor Holding A. Overhaul Económico y HI = 4,0	75 -
	8.8	Mapa Conceptual: Metodología de Cálculo de Índice de Salud	76 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Curva de la bañera "bathcurve". Fuente: (Parra, 2018)7 -
Figura 2-2: Estructura de Costos en el Ciclo de Vida de un activo. Fuente: (Parra, 2005) 10 -
Figura 2-3: Grafico HI vs Tiempo. Fuente: (Crespo, 2019) 15 -
Figura 2-4: Índice de Salud Actual Inicial vs Tiempo. Fuente: Autor 20 -
Figura 2-5: HI y HI _i vs Tiempo. Fuente: Autor. — 25 -
Figura 3-1: Tasa de fallas vs Tiempo 30 -
Figura 4-1: Esquema de la planta GNL Quintero. Fuente: (GNL Quintero, 2008) 36 -
Figura 4-2: Sección transversal del Compresor Laby. Fuente: Burckhardt Compression 38 -
Figura 4-3: Esquema del Compresor Laby. Fuente: Burckhardt Compression 39 -
Figura 4-4: HI _i vs Tiempo, Compresor Holding A. Fuente: Autor 43 -
Figura 4-5: Diagrama de Influencias. Compresor Holding A. Fuente: Autor 47 -
Figura 4-6: Índice de Salud Actual vs Tiempo, Compresor Holding A. Fuente: Autor 48 -
Figura 4-7: Parámetros de Weibull del Compresor Holding A 48 -
Figura 4-8: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 1 53 -
Figura 4-9: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 1 54 -
Figura 4-10: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 2 54 -
Figura 4-11: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 2 55 -
Figura 4-12: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 3 56 -
Figura 4-13: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 3 56 -
Figura 4-14: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 4 57 -
Figura 4-15: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 4 57 -
Figura 4-16: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 5 58 -
Figura 4-17: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 5 59 -
Figura 4-18: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 6 60 -
Figura 4-19: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 6 60 -
Figura 5-1: Costos por Confiabilidad según Weibull, Caso Teórico y O. Económico; Error!
Marcador no definido.
Figura 8-1: Mapa conceptual: Índice de Salud. Fuente: Autor 76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Datos operativos Compresor Holding A.	41 -
Tabla 4-2: Referencia de los Factores de Emplazamiento	41 -
Tabla 4-3: Factores de emplazamiento, Compresor Holding A.	42 -
Tabla 4-4: Modificadores de Salud, Compresor Holding A.	45 -
Tabla 4-5: Modificadores de Confiabilidad, Compresor Holding A	46 -
Tabla 4-6: Parámetros de Weibull del Compresor Holding A	48 -
Tabla 4-7: Valores del factor k y tasa de fallas corregida $\lambda * k$, Compresor Holding A	49 -
Tabla 4-8: Calculo de fallas anuales, Compresor Holding A.	50 -
Tabla 4-9: Costo de operación, Compresor Holding A.	51 -
Tabla 4-10: Resumen de los resultados obtenidos	61 -
Tabla 5-1: Cantidad de fallas anuales según, Weibull, Caso Teórico y O. Económico	64 -

1 INTRODUCCIÓN

Desde su puesta en marcha, GNL Quintero ejecuta actividades de mantenimiento preventivo y correctivo a los activos de la empresa, sin embargo, con la finalidad de optimizar los costos y aumentar la eficiencia de los procesos productivos, actualmente el equipo de mantenimiento trabaja en desarrollar un modelo basado en Confiabilidad.

Para concretar lo anterior se decide aplicar la metodología de Ingeniería Económica denominada: Análisis de Costo de Ciclo de Vida (ACCV), la cual sirve especialmente como plataforma para poder determinar el impacto del factor Confiabilidad dentro del ciclo de vida operacional de los activos en su sistema de producción, dado que esta técnica permite estimar el total de todos los costos asociados a la operación de un activo durante su vida esperada, estos son: inversión inicial, costos de mantenimientos preventivos, costos de mantenimiento mayor, costos de operación, costos asociados a los eventos de falla y la disposición final.

Tradicionalmente se han utilizado distintos métodos de estimación de los costos e impacto asociados a los eventos de fallas, sin embargo, es uno de los aspectos del cálculo con mayor inexactitud por el desconocimiento de la probabilidad de la ocurrencia de los diferentes eventos de fallas en un sistema de producción compuesto por activos complejos y el desconocimiento del comportamiento de los procesos de deterioro.

Para estimar la ocurrencia de los eventos de falla de un activo se han desarrollado distintos modelos que buscan simular la tendencia de la **tasa de fallas** del mismo, en base a información proporcionada por los fabricantes, experiencia del personal, clasificación del activo e históricos de fallas.

Estos modelos estudian el concepto de Confiabilidad, que se define como la aptitud de un elemento para cumplir con unas funciones prefijadas y mantenerse en los límites establecidos para las condiciones de explotación dadas durante un intervalo de tiempo requerido (Parra y Crespo, 2017). El proceso de análisis estadístico de la Confiabilidad busca expresar matemáticamente la **tasa de fallas** a través de distintos modelos de distribución probabilística, tales como, la distribución Exponencial, aplicada generalmente a sistemas eléctricos, y la distribución de Weibull, aplicada generalmente a sistemas rotativos, entre otras.

Gracias a estas herramientas es posible estimar la cantidad de fallas de un activo para un periodo determinado y así calcular los costos asociados a las mismas, sin embargo, este proceso tiene una limitación importante, la tasa de fallas se considera constante durante toda la vida del activo.

Es por esto que el presente trabajo propone una metodología de cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida que incorpora aspectos de Salud de Activos como una herramienta que permite cuantificar la cantidad de deterioro de un activo en el tiempo, con el objetivo de relacionar matemáticamente la tasa de fallas con la condición del activo. La metodología propuesta en este estudio será aplicada a un compresor de BOG (*boil off gas*) de la empresa GNL Quintero S.A.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Diseñar un modelo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida incorporando aspectos de Salud de Activos, de manera que se cuantifique el impacto del deterioro de los activos en la frecuencia de fallas y por tanto, en el costo de ciclo de vida.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Reconocer las variables requeridas para desarrollar la metodología de Índice de Salud de Activos aplicada a un compresor de BOG.
- Identificar los modificadores operacionales y de Confiabilidad que afectaran a la salud del activo de estudio.
- Desarrollar una metodología de Índice de Salud de Activos aplicada a un compresor de gas que permita simular distintos escenarios posibles.
- Desarrollar un modelo matemático que permita relacionar el deterioro de los activos con la tasa de fallas, utilizando un modelo de tasa de fallas por distribución de Weibull.
- Aplicar la metodología del Análisis de Costo de Ciclo de Vida para cada escenario simulado.
- Comparar con metodologías tradicionales de costo de ciclo de vida.
- Concluir a cerca del efecto de la salud sobre el costo de ciclo de vida.

1.2 Descripción del Problema

El cálculo del costos de ciclo de vida (definido como serie de estados por los que pasa un elemento desde su concepción hasta su eliminación, según la UNE-EN 13306:2018) de cualquier activo, tiene por objetivo servir de apoyo a distintos tipos de análisis que se basen en el cómputo de todos los costos que se puede imputar a un activo a lo largo de su vida útil, tales como, inversión inicial, operación, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, mantenimiento mayor y el valor residual al fin de su vida útil.

Es de especial interés mejorar las técnicas que se utilizan para cuantificar los costos de mantenimiento correctivo y preventivo de manera que se pueda disminuir la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones de áreas de vital importancia tales como: diseño, desarrollo, comparación, sustitución y adquisición de activos de producción.

La técnica utilizada ampliamente para esto es cuantificar el factor Confiabilidad y el impacto de los eventos de fallas sobre los costos totales de un sistema de producción a lo largo de su ciclo de vida. Para hacer una estimación del factor Confiabilidad se utiliza un modelo tradicional basado en una tasa probabilística de fallos constante, utilizando las distribuciones de Weibull, Exponencial y Log normal, según corresponda.

Si bien este modelo se ajusta a la realidad operacional de cada activo, el problema es que **asume que la tasa de fallas se mantiene constante en el tiempo** hasta el fin de la vida del activo. Por lo tanto, ignora factores fundamentales que pueden influir en ella y por consecuencia en la Confiabilidad de este, tal como el deterioro del activo por aspectos operacionales y ambientales.

El resultado de un Análisis de Costo de Ciclo de Vida evaluado con tal incertidumbre podría ser poco representativo y en consecuencia, de poca ayuda para la toma de decisiones que permitan optimizar las estrategias de operación y mantenimiento.

1.3 Contexto

Por un largo tiempo, las metodologías de gestión de activos que se usaban en la industria se concentraban en el análisis del control operativo durante el trabajo diario en conjunto con el impacto del mantenimiento para la disponibilidad. Posteriormente las energías se centraron en optimizar los ciclos de vida de los activos, disminuyendo costos y mejorando procesos. Finalmente se han incorporado temáticas de gestión del riesgo teniendo como principal objetivo priorizar las tasas de mantenimiento para los activos críticos (Crespo, 2019).

Hasta la fecha GNL Quintero ejecuta actividades de mantenimiento preventivo planificadas según periodos, principalmente anuales, semestrales y trimestrales, centradas en el chequeo de los distintos elementos que componen el sistema de compresión de BOG, chequeo de fugas y ruidos anormales, como también medición de variables físicas del compresor y motor eléctrico para verificar su correcto funcionamiento.

El activo de este estudio representa un equipo de alta complejidad técnica como también una gran inversión de capital, por lo tanto, es de vital importancia la búsqueda continua de estrategias de mantenimiento que permitan conseguir la mayor disponibilidad posible, asegurar su salud integral, como también minimizar los costos asociados a su operación, con el objetivo de conseguir la máxima rentabilidad de su proceso productivo. Es por lo anterior que la empresa GNL Quintero decide dar un paso adelante y cambiar el enfoque en la gestión de sus activos, concentrando los esfuerzos en diseñar estrategias de mantenimiento que permitan tomar decisiones basándose en la condición de los activos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Indicadores básicos del Análisis Estadístico de Confiabilidad

Según (Jardine, 1999) citado en (Crespo y Parra, 2017) el concepto de Confiabilidad puede definirse como la probabilidad de que un elemento funcione de manera satisfactoria durante un periodo de tiempo determinado en el que es utilizado en condiciones de funcionamiento especificadas.

Uno de los objetivos más importantes del estudio de la Confiabilidad es disminuir la incertidumbre de la ocurrencia de la falla en los activos, para esto se analizan cinco indicadores relacionados con el comportamiento de la variable aleatoria, que será definida como tiempo entre fallas (*time to failure*, *TTF*):

- La función densidad de probabilidad de la falla, f(x)
- La función de distribución acumulada de probabilidad de la falla, F(x)
- La función de distribución acumulada inversa de probabilidad de que no ocurra la falla,
 C(x)
- La función frecuencia de fallas, $\lambda(x)$
- La media (esperanza matemática), E(x) o MTBF (tiempo promedio hasta la falla)

2.1.1 Modelo Probabilístico según Distribución de Weibull

Weibull es una distribución de probabilidad continua, la cual modela la distribución de fallas en sistemas o activos cuando la tasa de probabilidad de fallas varía en el tiempo. Estudia la variable aleatoria continua "tiempo hasta la falla", la información básica requerida para este tipo de análisis son las bases de datos donde se almacenan los registros de tiempos históricos de fallas de los equipos (Crespo y Parra, 2017).

La distribución de Weibull es ampliamente usada en el estudio de fallas de componentes mecánicos dado que el número de ocurrencia de eventos de falla por unidad de tiempo no permanece necesariamente constante en el tiempo, es decir, la tasa de fallas puede crecer o decrecer en el tiempo.

Esta distribución permite ajustar la variable aleatoria evaluada a diferentes comportamientos de fallas ya que contiene dos parámetros matemáticos: η , parámetro de escala, cuya unidad es tiempo/falla; y β , parámetro de forma, adimensional. El comportamiento de la tasa de fallas en este caso cambia en función del tiempo de operación y se conoce como la curva de la bañera "bathcurve" (**Figura 2-1**).

Como ya fue comentado, los parámetros se determinan a partir del historial de fallas del activo y son propios del mismo.

El parámetro de forma, β , define la tendencia de la *tasa de fallas* $\lambda(x)$ en el tiempo como se describe a continuación:

- β <1, la frecuencia de fallas $\lambda(x)$ decrece, representa el periodo de infancia del activo.
- $\beta=1$, $\lambda(x)$ es constante.
- β >1, la frecuencia de fallas $\lambda(x)$ crece, representa la fase de envejecimiento del activo.

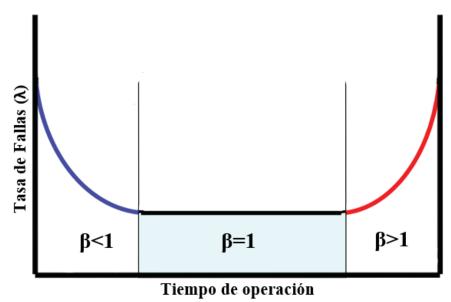


Figura 2-1: Curva de la bañera "bathcurve". Fuente: (Parra, 2018)

2.1.2 Indicadores de Confiabilidad de la Distribución de Weibull

• La función densidad de probabilidad de falla, f(x).

$$f(x) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot x^{\beta - 1} \cdot e^{\left(\frac{-x}{\eta}\right)^{\beta}}$$
 (Ec. 1)

• La función de distribución acumulada de probabilidad de falla, F(x).

$$F(x) = 1 - e^{\left(\frac{-x}{\eta}\right)^{\beta}}$$
 (Ec. 2)

La función de distribución acumulada inversa de probabilidad de que no ocurra la falla,
 C(x).

$$C(x) = 1 - F(x) = e^{\left(\frac{-x}{\eta}\right)^{\beta}}$$
 (Ec. 3)

• La función frecuencia de fallas, $\lambda(x)$.

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{C(x)} = \frac{\beta \cdot x^{(\beta - 1)}}{\eta^{\beta}}$$
 (Ec. 4)

• La media (esperanza matemática), E(x).

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx = MTBF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$
 (Ec. 5)

Donde:

x = Variable aleatoria continua, definida como tiempo hasta la falla.

 η = Parámetro de escala, vida característica.

 β = Parámetro de forma.

 Γ = Función Gamma.

2.2 Análisis de Costo de Ciclo de Vida

Para evaluar los costos asociados al Ciclo de Vida de un sistema de producción, existe un conjunto de procedimientos que se agrupan en las denominadas: Técnicas de Análisis de Costo de Ciclo de Vida. La implementación temprana de las técnicas de costos permite evaluar de forma anticipada los potenciales problemas de diseño y cuantificar el viable impacto en los costos a lo largo del ciclo de vida de los activos industriales (Durairaj y Ong, 2002) citados en (Parra, 2005). En particular, el objetivo es analizar el posible incremento de la tasa de fallas con la correspondiente repercusión en los costos de mantenimiento correctivo y preventivo para la correcta toma de decisiones que garantice la mejor relación costo-beneficio posible.

Algunas definiciones para destacar de ACCV son:

- 1. Woodhouse (1999), define Análisis de Costo de Ciclo de Vida como un proceso sistemático de evaluación técnico-económica, aplicada en el proceso de selección y reemplazo de sistemas de producción, que cuantifica el impacto real de todos los costos a lo largo del ciclo de vida de los activos y de esta forma poder seleccionar el activo que aporte los mayores beneficios al sistema productivo.
- 2. La UNE 60300-3-3 define al Análisis de Costo de Ciclo de Vida como una técnica o herramienta que permite comparar cálculos de costos hechos sobre determinado periodo de tiempo, teniendo en cuenta los costos de capital inicial, los de operación futuros y el cálculo de los costos de sustitución a través de la vida y su fin o el fin de interés.

En particular, para poder realizar de forma efectiva un ACCV, es necesario aclarar los siguientes conceptos:

- Características de los costos: El costo de ciclo de vida se determina identificando las
 funciones aplicables en cada una de sus fases, calculando el costo de estas funciones y
 aplicando los costos apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida. Para que esté
 completo, el costo de ciclo de vida debe incluir todos los costos de diseño, adquisición,
 operación, mantenimiento y producción y disposición final.
- En el análisis de los costos asociados a un activo, estos se agrupan en dos grandes grupos,
 CAPEX y OPEX. Los CAPEX o Costos de Capital incluyen diseño, desarrollo,
 adquisición, instalación, entrenamiento de staff, manuales, documentación, herramientas

e instalaciones para mantenimiento y repuestos de aseguramiento. Por otra parte, los OPEX o costos operacionales, incluyen mano de obra, operaciones, mantenimiento planificado, almacenamiento, contrataciones, mantenimiento correctivo – penalizaciones por eventos de fallas/baja confiabilidad y desincorporación.

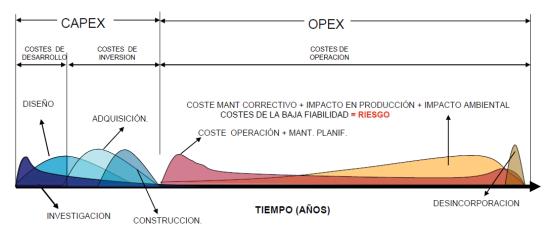


Figura 2-2: Estructura de Costos en el Ciclo de Vida de un activo. Fuente: (Parra, 2005)

- Tasa de descuento: es el costo de capital que se aplica para determinar el valor presente de un pago futuro, es decir, la tasa de descuento es útil para conocer el valor del dinero del futuro en la actualidad.
- Impacto de la tasa de descuento: expresar los costos en valor presente permitirá una comparación directa de año en año, ante posibles cambios inflacionarios, efectos económicos de acuerdos contractuales con los proveedores, cambios en los niveles de precios, etc., aspectos que a menudo pueden causar alguna confusión durante la evaluación de diferentes alternativas.
- Ciclo de vida útil esperado: la vida de un sistema (proceso, elemento componente, equipo) es definida en términos semejantes a la vida humana, como el promedio de años en el cual se espera que el sistema funcione. Es necesario definir la cantidad de años que el activo funciona hasta el overhaul para realizar los cálculos.

2.2.1 Modelo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida (cálculo de costos por Confiabilidad según modelo de Weibull)

Como modelo para el cálculo del costo del ciclo de vida se aplica la formulación y elementos de costo recogidos en el modelo de (Woodward, 1997) citado en (Crespo, 2019), el cual se plantea mediante el siguiente procedimiento:

- Establecer las condiciones operacionales del sistema. Describir los modos de operación del sistema (carga completa, media carga, sin carga) y las capacidades de producción a satisfacer.
- 2. Establecer los factores de utilización. Estos factores deben indicar el estado de funcionamiento dentro de cada modo de operación.
- 3. Identificar para cada alternativa todas las categorías de costos básicos: inversión inicial, desarrollo, adquisición, mantenimiento planificado, reposición.
- 4. Determinar para cada alternativa los costos de Confiabilidad (CTPF). Identificar los principales tipos de fallo y la frecuencia de ocurrencia del tiempo, que serán calculadas a partir de la distribución probabilística de Weibull.
- 5. Determinar los costos críticos. Identificar las categorías de costos de mayor impacto, y analizar los factores que propician los altos costos.
- 6. Calcular todos los costos en valor presente (P) para cada alternativa. Definir la tasa de descuento, el periodo de vida útil esperado y estimar los costos totales en valor presente.
- 7. En referencia al esquema de la figura CAPEX y OPEX, el modelo de Woodward propone la siguiente expresión para calcular los diferentes costos que genera un activo industrial a lo largo de su ciclo de vida. (Woodward, 1997)(Blanchard y Fabrycky 1998) citados en (Crespo, 2019)

La ecuación de Análisis de Costo de Ciclo de Vida es:

$$ACCV(P) = \sum_{1}^{T} CI + CO + CMP + CTPF + CMM - VR$$
 (Ec. 6)

Donde:

ACCV(P) = Costos totales del ciclo de vida en valor presente (P), para una tasa de descuento (i) y en un periodo de vida útil esperado (T).

CI = Costo inicial de adquisición e instalación en valor actual.

CO = Costos operacionales en valor anualizado.

CMP = Costos de mantenimiento preventivo en valor anualizado.

CTPF = Costos totales por fallas en valor anualizado.

CMM = Costos de mantenimiento mayor en valor actual.

VR = Valor residual del activo al alcanzar el final de la vida útil en valor futuro.

Todas las categorías de costos se convertirán a valor presente, salvo el Costo inicial de adquisición e instalación "CI".

2.2.2 Ecuaciones de Cálculo de equivalencia del Valor del dinero en el tiempo

Para continuar el cálculo de ACCV es necesario definir las fórmulas del valor presente dado un valor anualizado, y el valor presente dado su valor futuro, estas se presentan a continuación:

• Dado un valor anualizado (A), su valor presente (P) es igual a:

$$P = A \cdot VPA \tag{Ec. 7}$$

$$VPA = \frac{(1+i)^t - 1}{i \cdot (1+i)^t}$$
 (Ec. 8)

• Dado un valor futuro (F), su valor presente (P) es igual a:

$$P = F \cdot VP \tag{Ec. 9}$$

$$VP = \frac{1}{(1+i)^t}$$
 (Ec. 10)

Donde:

i =Tasa de interés.

t = Periodo de tiempo en años.

2.2.3 Cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida

• Costos operacionales en valor presente:

$$CO(P) = CO(A) \cdot VPA$$
 (Ec. 11)

• Costos de mantenimiento preventivo en valor presente:

$$CMP(P) = CMP(A) \cdot VPA$$
 (Ec. 12)

• Costos totales por falla:

$$CPF(A) = \sum_{i=1}^{F} \delta_i \cdot C_i \left[\frac{\$}{a\tilde{n}o} \right]$$
 (Ec. 13)

Donde:

 $\delta_i = \frac{1}{MTBF}$ = Frecuencia de la falla *i* en unidades (*fallas/tiempo*).

 C_i = Costo de la falla i.

La expresión *CPF* (*A*) representa el valor probable de dinero que se va a necesitar cada año para solventar los problemas de Confiabilidad ocasionados por los eventos de falla, suponiendo que la tasa de fallas será constante durante la vida del activo.

$$CTPF(P) = CPF(A) \cdot VPA$$
 (Ec. 14)

La expresión *CTPF* (*P*) representa la cantidad del dinero, hoy, que se necesita para poder cubrir los gastos anuales esperados por las fallas durante (T) años.

• Costo de mantenimiento mayor:

$$CMM(P) = CMM(F) \cdot VP$$
 (Ec. 15)

2.3 Índice de Salud de Activos

Un índice de salud de activo (*Asset Health Index* por sus siglas en inglés) es un número adimensional comprendido entre 0,5, que corresponde a su estado o condición como nuevo, y el valor 10, correspondiente a la condición del equipo al final de su vida útil. El índice de salud supone un comportamiento exponencial frente a la edad del mismo y se calcula mediante una evaluación de todos los factores que influyen en su ciclo de vida. El índice de salud representa una metodología práctica para cuantificar el estado general y el nivel deterioro de un activo complejo, proyectarla al futuro y estimar los costos de operación y mantenimiento, por lo tanto, el índice de salud no es una herramienta de monitorización, sino una herramienta que permite establecer una tendencia en base a toda la información recopilada (Crespo, 2019).

La ISO 55000 define activo como algo que posee valor potencial o real para una organización. El valor puede variar entre diferentes organizaciones y sus partes interesadas y puede ser tangible o intangible, financiero o no financiero.

El cálculo del índice de salud de un activo y su proyección en el tiempo permite estimar la velocidad con la cual este de deteriora y proyectar cuan cerca está del fin de su vida útil.

Los principales objetivos perseguidos con la aplicación de esta metodología son:

- Valorar la probabilidad de falla de un equipo en función de su índice de salud.
- Comparar la salud de activos del mismo tipo, en distintas ubicaciones.
- Optimizar los planes de operación y mantenimiento.
- Priorizar actividades de grandes mantenimientos y/o sustituciones.
- Extender la vida útil de los activos.
- Minimizar el riesgo.

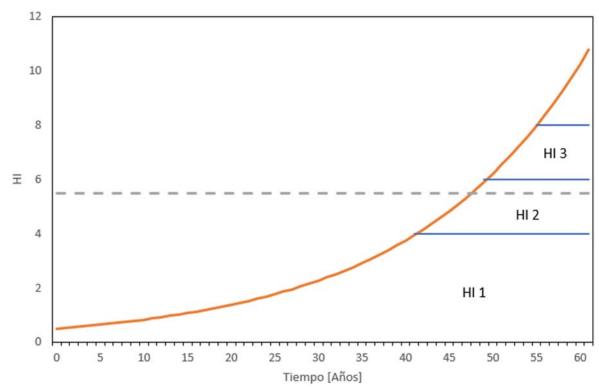


Figura 2-3: Grafico HI vs Tiempo. Fuente: (Crespo, 2019)

La **Figura 2-3** muestra distintos rangos del Índice de Salud de un activo y para cada rango se espera un comportamiento específico:

- HI1: El primer rango de la vida del activo desde su puesta en marcha, donde su Índice de Salud va desde HI=0,5 hasta HI=4, en este rango se espera que el comportamiento del activo se asemeje al de un equipo nuevo.
- HI2: En este periodo comienzan a aparecer los primeros síntomas de desgaste en el equipo. En este rango el Índice de Salud está en el intervalo HI=4 – HI=5. El valor HI=5,5 corresponde al valor de salud de la vida normal según la categoría del activo.
- HI3: Este rango corresponde al periodo de envejecimiento del equipo, el Índice de Salud en este caso está en el intervalo HI=6 HI=8.
- La metodología supone que pasado el valor de HI=8 el activo se encuentra al final de su vida útil.

2.3.1 Metodología de Cálculo del Índice de Salud de Activos

Para aplicar efectivamente esta metodología a un activo específico es importante determinar cuáles son los modificadores operacionales y de Confiabilidad que afectarán a la salud del mismo, como también sus modos de falla, historial de operación y mantenimientos, entre otros.

A continuación se citan los datos de entrada necesarios para el cálculo de índices de salud de un activo:

- La identificación del activo, es decir, la edad actual, la vida esperada, nombre de fabricante, modelo y localización en la instalación.
- Datos registrados durante la operación del equipo en el tiempo de estudio, como por ejemplo, carga a la que se somete, número de paradas y arranques, consumo de energía o combustible según corresponda, caudales, presiones, temperaturas, entre otros.
- Resultados de análisis realizados al equipo con el fin de deducir sobre su condición o
 nivel de deterioro, tales como, análisis de vibraciones, termografía, inspección visual de
 aspectos como el estado de sellos, fugas de líquidos y nivel de corrosión,

Se detalla a continuación cada uno de los cinco pasos de la metodología de cálculo de Índice de Salud como es descrita en (Crespo, 2019).

2.3.2 Vida Normal Estimada

En el primer paso, se debe identificar el activo de estudio y definir toda la información relevante referente a su ubicación técnica, es decir, las características del lugar en donde está instalado. Para calcular la vida normal estimada se deben definir los conceptos de:

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

Las definiciones de **categoría**, **sub-categoría** y **aplicación** abarcan identificar que activo del negocio va a ser objeto del estudio según la estructura de descripción de la ISO 14224, por ejemplo para el compresor de este estudio:

- Categoría: Compresor.
- Sub-categoría: Compresor recíproco, de doble acción, de dos etapas, con pistones laberinticos de sellado sin contacto.
- Aplicación: Compresión de gas.

Es necesario también definir, fabricante, modelo y todas las especificaciones técnicas del activo ya que esta información será la base lógica para la definición de los parámetros de confiabilidad y modificadores de salud.

Luego de identificar los activos de estudio, el siguiente concepto a abordar es la **vida normal estimada del activo**, que representa el intervalo de tiempo en el que el activo cumple su función hasta llegar al final de su vida útil (o overhaul), y por lo general se expresa en horas de funcionamiento. Este es un dato que generalmente procede del fabricante y muchas veces se corrige en base a la experiencia de la dirección técnica de la empresa.

2.3.3 Vida Estimada

La vida estimada trata de caracterizar la vida normal esperada en función de su ubicación técnica concreta, teniendo como entrada dos conceptos importantes:

- Factores de emplazamiento.
- Factor de carga.

El objetivo de los factores de emplazamiento es caracterizar todos aspectos relevantes de la instalación y la zona geográfica en donde el equipo está ubicado, los cuales pueden afectar negativamente su salud, tales como exposición a agentes medioambientales, exposición a la intemperie, cercanía al mar, y altura de la zona con respecto al nivel del mar.

Teniendo este concepto, lo siguiente es obtener la información que se requiere para definir cada uno de los factores de emplazamiento:

- Ubicación técnica del emplazamiento, es decir, la zona geográfica.
- Situación exterior/interior del activo: Este parámetro se tendrá en cuenta para definir si el equipo será afectado negativamente por agentes medioambientales.

- Distancia a la costa: Este parámetro explica la posibilidad de que un activo se deteriore por estar cercano a la costa, la humedad y el ambiente corrosivo pueden causar daños a la salud del mismo.
- Promedio de la temperatura exterior: Promedio anual registrado de temperatura en la zona geográfica en donde el equipo se encuentra instalado. Este factor debe reflejar el impacto negativo de la temperatura en el equipo de estudio.
- Exposición a agentes tales como polvo en suspensión y atmósfera corrosiva: La cercanía de las instalaciones a fuentes industriales de alta emisión de partículas como también la exposición a atmosfera con altos niveles de agentes corrosivos afectará negativamente la salud del equipo.

Si la ubicación técnica del activo es exterior, el cálculo del factor combinado de localización se obtiene según la siguiente ecuación:

$$F_E = \max(F_{DC}, F_{SEI}, F_T, F_A, F_{PS}, F_{AT})$$
 (Ec. 16)

Donde:

 F_E = Factor de emplazamiento.

 F_{DC} = Factor de distancia a la costa.

 F_{SEI} = Factor de situación exterior o interior.

 F_T = Factor de temperatura.

 F_A = Factor de altura con respecto al nivel del mar.

 F_{PS} = Factor de polvo en suspensión.

 F_{AT} = Factor de atmósfera corrosiva.

En el caso de que la ubicación técnica del activo sea interior con atmósfera controlada todos los factores mencionados pierden relevancia y el Factor de Emplazamiento será igual a 1.

El **Factor de Carga** de cada equipo viene definido por la relación entre la carga del equipo en su punto de funcionamiento esperado (o punto de garantía) según las características de la instalación donde este está ubicado, y la carga máxima a la que podría someterse. Por lo tanto,

el Factor de Carga es el resultado de las condiciones de funcionamiento para las cuales se diseñó la instalación, este tomara valores en el intervalo [0,1].

Estos datos quedarán registrados por el fabricante en el manual del equipo como parte de la entrega y puesta en marcha.

El Factor de Carga se determina según la siguiente ecuación:

$$F_C = Factor\ de\ carga = \frac{Carga\ en\ el\ punto\ de\ garantía}{Carga\ máxima\ admisible}$$
 (Ec. 17)

La Vida estimada del activo es el cociente de la vida normal estimada obtenida anteriormente y el producto de los Factores de Carga y Emplazamiento.

$$Vida\ estimada = \frac{Vida\ normal\ estimada}{F_E \cdot F_C} \tag{Ec. 18}$$

Por lo tanto, la vida útil del activo puede verse modificada por las características de su ubicación técnica y la función que cumple.

2.3.4 Tasa de Envejecimiento

Para expresar el comportamiento exponencial del Índice de Salud de un activo con respecto a su edad es necesario determinar la tasa de envejecimiento de este, para luego aplicar el efecto de los distintos fenómenos que el activo puede experimentar a través de los distintos modificadores diseñados en cada caso.

La tasa de envejecimiento viene determinada por el logaritmo natural del cociente entre la salud correspondiente al activo nuevo y la salud que tendría cuando alcanza la Vida estimada:

$$\Phi = \frac{\ln\left(\frac{HI_{vida\ estimada}}{HI_{nuevo}}\right)}{Vida\ estimada} = \frac{2,4}{Vida\ estimada}$$
(Ec. 19)

Donde:

 Φ = Tasa de envejecimiento del activo.

 $HI_{nuevo} = 0.5$ = Valor de la salud correspondiente a un activo nuevo.

 $HI_{vida\ estimada} = 5.5$ = Valor de la salud correspondiente a un equipo que ha alcanzado su tiempo de vida estimada, según el fabricante.

Vida estimada = Valor calculado según la ecuación Ec. 18

2.3.5 Índice de Salud Actual Inicial

El Índice de Salud, como se mencionó previamente, es un número adimensional que está comprendido entre 0,5 y 10, y tiene una tendencia exponencial respecto a la edad del activo:

$$HI_i(t) = HI_{nuevo} \cdot e^{\Phi \cdot t}$$
 (Ec. 20)

Donde:

 $HI_i(t)$ = Índice de Salud Inicial para cada edad del equipo, es decir, para cada periodo de tiempo evaluado.

 $HI_{nuevo} = 0.5$ = Valor de la salud correspondiente a un activo nuevo.

 Φ = Tasa de envejecimiento.

t = Edad actual del activo (en unidades de tiempo).

La siguiente figura es un ejemplo del Índice de Salud Actual Inicial para un activo con una Vida estimada de 40 años, con un Factor de Carga y Emplazamiento inherentes a su ubicación técnica particular.

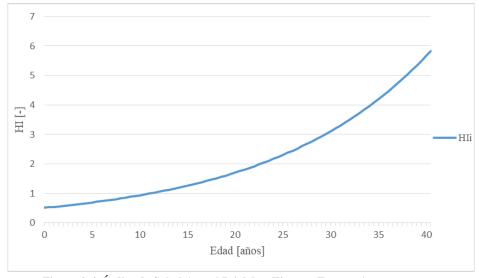


Figura 2-4: Índice de Salud Actual Inicial vs Tiempo. Fuente: Autor

2.3.6 Índice de Salud Actual

El Índice de Salud Actual (HI), es el resultado de la aplicación de los distintos modificadores que reflejan matemáticamente la evidencia de deterioro o desgaste en el activo. Los modificadores se clasifican en tres categorías: Salud, Confiabilidad y Carga. La ecuación del Índice de Salud Actual es:

$$HI(t) = HI_{nuevo} \cdot e^{\frac{\Phi \cdot t}{M_C(t)}} \cdot M_S(t) \cdot M_F(t)$$
 (Ec. 21)

Donde:

HI(t) = Es el Índice de Salud Actual para cada edad del activo.

 M_S = Es el modificador de Salud para cada edad del activo.

 $M_F={
m Es}$ el modificador de Confiabilidad para cada edad del activo.

 M_C = Es el modificador de Carga para cada edad del activo.

Por lo tanto, el Índice de Salud de un activo cualquiera estará determinado por sus condiciones de operación, su nivel de deterioro y su confiabilidad, y cada uno de estos factores debe ser evaluado en cada periodo de evaluación para el cálculo de su Índice de Salud.

2.3.6.1 Modificador de Salud

Para la evaluación del **Modificador de Salud** (M_s) se deben diseñar un conjunto de modificadores de salud que reflejan distintos aspectos de la condición del activo a través de inspecciones y chequeos realizados al mismo y siempre dependerán de la sub-categoría del activo en evaluación. A continuación se citan algunos ejemplos:

- Resultados de análisis y test realizados al equipo, como análisis de aceite, test de aislamiento, boroscopía, termografía, niveles de fluidos, etc.
- Medidas de variables físicas en continuo, como la medida de vibraciones.
- Evaluación de los datos de operación medidos durante los periodos analizados, tales como, caudal, temperatura, rpm, consumo eléctrico, etc.

Dado que los modificadores de salud señalan aspectos de desgaste y anomalías en la operación de activo, estos están diseñados de manera que penalicen la salud del activo, y cada uno de ellos

debe reflejar distintos niveles de deterioro para su efecto correspondiente. Los modificadores de salud estarán comprendidos en el intervalo [1,1.5], el valor de cada modificador se acerca a 1,5 conforme empeora su condición.

Para cada activo es necesario diseñar una tabla referencial con el conjunto de modificadores de salud que le correspondan, y a su vez cada categoría de modificador con sus respectos niveles de penalización.

La ecuación para obtener el valor del Modificador de Salud (M_S) es:

$$M_S(t) = \prod_{j=1}^{j=n} M_{S_j}(t)$$
 (Ec. 22)

Donde:

j = 1, 2, ..., n = Es un índice utilizado para distintos modificadores de salud.

 $M_S(t)$ = Es el modificador de salud para cada edad del activo.

2.3.6.2 Modificador de Confiabilidad

Para algunos activos se puede considerar que tienen una Confiabilidad la cual se aleja significativamente al resto de los activos dentro de su misma categoría. Generalmente estos problemas se identifican por la notación del fabricante en conjunto con las investigaciones y experiencia de la empresa. Este fenómeno se debe considerar para calcular el Índice de Salud y se aplica a través del **Modificador de la Confiabilidad** (M_F), los modificadores de confiabilidad pueden ser asociados a la cantidad de overhauls realizados al equipo, el porcentaje de inactividad y la confiabilidad con respecto al promedio.

La ecuación para obtener el valor del Modificador de Confiabilidad (M_F) es:

$$M_F(t) = \prod_{k=1}^{k=m} M_{F_k}(t)$$
 (Ec. 23)

Donde:

k = 1, ..., m = Es un índice para distintos modificadores de confiabilidad.

 $M_F(t)$ = Es el modificador de confiabilidad para cada edad del activo.

2.3.6.3 Modificador de Carga

La carga real registrada en la operación de los activos es variable y dependerá de distintos factores externos de la ubicación técnica. La tasa de deterioro de los conjuntos mecánicos que componen a un activo complejo depende directamente de la carga a la que son sometidos, por lo tanto, es de importancia considerar este efecto en el cálculo de salud.

El **Modificador de Carga** (M_C), representa la relación entre la carga en el punto de garantía del activo dada por las características de diseño e instalación del activo y la carga registrada real en condiciones de operación para cada periodo evaluado:

$$M_{C}(t) = \frac{\frac{Carga\ en\ el\ punto\ de\ garantía}{Carga\ máxima}}{\frac{Carga\ real\ registrada(t)}{Carga\ máxima}}$$
(Ec. 24)

Donde:

 $M_C(t)$ = Modificador de Carga para cada edad del activo.

La **Figura 2-5** muestra gráficamente la influencia de los distintos elementos que componen el cálculo de Índice de Salud de un activo determinado:

- Los factores externos que conforman el Factor de Emplazamiento, como también la carga en el punto de garantía, es decir, el resultado de las condiciones de funcionamiento para las cuales se diseñó la instalación, afectarán la Vida Estimada del activo.
- Los Modificadores de Salud, los cuales demuestran deterioro y/o anomalías en la operación del activo y los Modificadores de Confiabilidad que demuestran cambios de la Confiabilidad del activo, penalizan el Índice de Salud Actual (HI), acercándolo al final de su vida útil.
- El aumento de la carga real de operación aumenta la tasa de deterioro de los distintos elementos que componen el activo, por lo tanto, el Modificador de Carga penaliza el Índice de Salud Actual (*HI*), acercándolo al final de su vida útil.

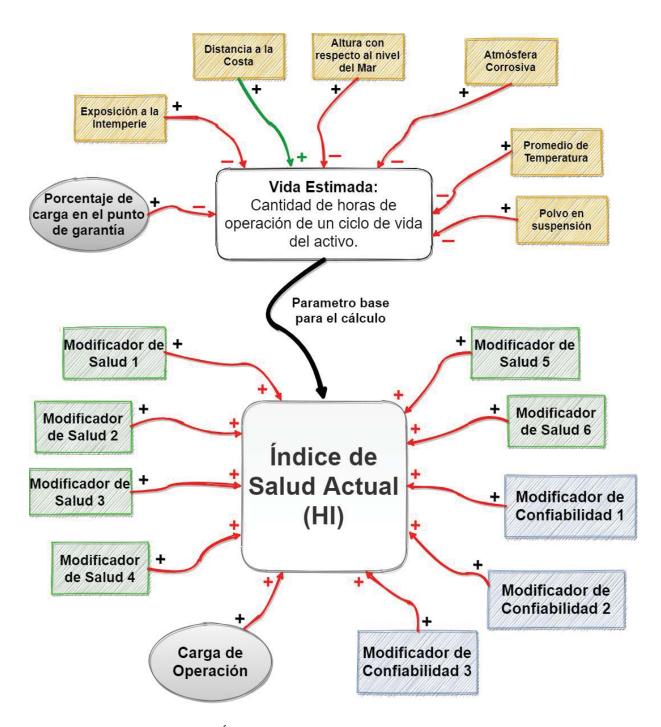


Figura 2-5: Diagrama de Influencias, Índice de Salud de Activos. Fuente: Autor.

El Índice de Salud Actual descrito según la ecuación **Ec. 21** se obtiene para cada edad del activo registrando detalladamente el cambio de cada uno de los modificadores. El efecto que tienen los modificadores de salud del activo en el cálculo del Índice de Salud se ilustra a modo de ejemplo en la siguiente figura:

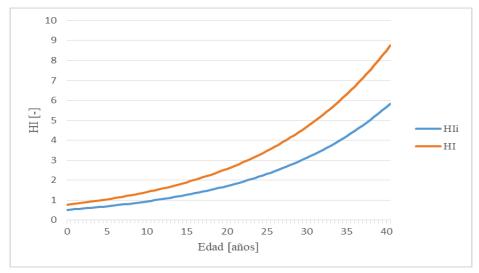


Figura 2-6: HI y HI_i vs Tiempo. Fuente: Autor.

La **Figura 2-6** muestra el Índice de Salud Actual Inicial (*HI_i*) y el Índice de Salud Actual (*HI*) para un activo que tiene una vida estimada de cuarenta años, es decir, teóricamente al cabo de cuarenta años alcanzara el fin de su vida útil, donde su Índice de Salud toma el valor de HI=5,5. Al aplicar el efecto de los distintos modificadores que evidencian deterioro durante su operación el Índice de Salud es penalizado, es así que el Índice de Salud tomara el valor HI=5,5 en el año treintaidós, ocho años antes de lo esperado.

Con el Índice de Salud de Activo se genera una buena aproximación de manera que, con el conocimiento experto y buena accesibilidad a la información necesaria, se puedan obtener resultados semi-cuantitativos del estado de los equipos y hacer una proyección de este.

El diseño de estrategias de mantenimiento puede apoyarse también en esta metodología, en función del resultado obtenido se conoce el estado real del equipo en cuestión y el nivel necesidad o no de ejecutarle un mantenimiento programado. Al mismo tiempo la calidad de

cada mantenimiento preventivo ejecutado a los equipos se verá reflejado en el Índice de Salud como también problemas en el montaje, overhaul y efectividad de mantenimientos correctivos.

La extensión del ciclo de vida de los equipos se puede relacionar con el Índice de Salud, ya que permite tener información sobre el estado de los equipos y por lo tanto, calcular el punto óptimo del overhaul o reposición según corresponda.

En los procesos de inversión, donde se evalúan los costos a futuro, tal como el Análisis de Costo de Ciclo de Vida, se puede utilizar el índice de salud como una buena aproximación matemática para hacer una proyección de los CAPEX y OPEX basándose en el estado de los equipos.

3 DESARROLLO DEL MODELO

Se propuso crear una metodología y un modelo matemático que permita establecer una tendencia en el comportamiento de los eventos de falla de un equipo determinado basándose en el estado de este, tanto como en la información otorgada por expertos y el historial de fallas recopilado. Para desarrollar esta metodología y relacionar los aspectos de Confiabilidad con los costos, se aplicó el concepto de Análisis de Costos de Ciclo de Vida, incorporándole aspectos del cálculo de Índice de Salud de Activos.

Dicho lo anterior, se propuso utilizar la metodología de Índice de Salud de Activos para cuantificar la cantidad de deterioro del equipo en cada intervalo de tiempo analizado y relacionar los resultados con la *tasa de fallas* λ calculada según la distribución de Weibull, utilizando el historial de fallas del equipo.

3.1 Paso 1: Cálculo del Factor de corrección de la Salud

Como una forma de integrar el modelo de cálculo de Índice de Salud y el modelo de cálculo de Costos de Ciclo de Vida, se propone el uso del Factor de corrección de la Salud "k", para impactar la tasa de fallas asociada al activo físico con el estado real de la salud del mismo.

Considerando que los parámetros que permiten proyectar el comportamiento futuro de la tasa de fallas son obtenidos a partir de un registro histórico del mismo, o, por otro lado, provienen de banco de datos considerando comportamientos genéricos de equipos semejantes, estos no consideran el real estado de los Índices de Salud y de los factores y modificadores que los definen.

Por otro lado, se considera como hipótesis que, el Índice de Salud Actual Inicial (HI_i) sólo permite, como su nombre lo indica, seguir proyectando el estado de salud inicial e impactando la tasa de fallas futura, en función de esa situación, la inicial. Sin embargo, si se ajustan los valores de las tasas de fallas proyectadas por un factor multiplicador que denote la relación de proporcionalidad entre el Índice de Salud Actual Inicial (HI_i) y el Índice de Salud Actual (HI) se tendrá una representación mas realista de la tasa de fallas en los períodos futuros y que considere el comportamiento de los factores y modificadores considerados en su obtención.

Es así entonces que, El Factor de corrección de la Salud "k" representa la relación entre el Índice de Salud Inicial de un activo con una Vida normal estimada, un Factor de Emplazamiento y Carga inherentes a su ubicación técnica y, el Índice de Salud del mismo activo, afectado por la condición real del equipo, reflejada según el valor de cada uno de sus modificadores en el tiempo.

El Factor *k* es el cociente entre el Índice de Salud Actual *HI*, y el Índice de Salud Actual Inicial *HI*.

El Factor *k* se obtiene según la ecuación:

$$k(t) = \frac{HI(t)}{HI_i(t)}$$
 (Ec. 25)

Donde:

 $HI_i(t)$ = Es el Índice de Salud Actual Inicial para cada edad del activo.

HI(t) = Es el Índice de Salud Actual para cada edad del activo.

El cambio de cada uno de los modificadores que afectan la salud del activo de estudio en el tiempo será registrado y reflejado en su Índice de Salud Actual "*HI*", como también los factores externos inherentes de su ubicación técnica, su carga promedio y cantidad de horas trabajadas.

El Factor de corrección de la Salud "k" cumple la función de traducir la información del resultado semi-cuantitativo obtenida por el cálculo del Índice de Salud de un activo determinado y corregir proporcionalmente el comportamiento de la tasa de fallas, constituyéndose en un número adimensional que representa la cantidad de deterioro o desgaste del activo en relación a su condición teórica inicial.

El valor de *k* aumenta a medida que la salud del equipo empeora, o en otras palabras, cuanto más la salud del equipo (proyectada) se aleje de su condición inicial prevista.

En el siguiente paso se demuestra como el Factor de corrección de la Salud "k" es relacionado con la tasa de fallas del activo, por lo tanto, todo cambio en la condición del activo será reflejado por el valor del Factor de corrección de la Salud "k" y en consecuencia, en la tasa de fallas del activo.

3.2 Paso 2: Cálculo de λ corregido

Para reflejar el efecto causado por la cantidad deterioro de un equipo determinado, en la ocurrencia de eventos de falla del mismo, será necesario relacionar el Factor k con la tasa de fallas del equipo. La tasa de fallas λ del equipo se obtiene a través distribución de Weibull, por lo tanto, el equipo tendrá un periodo de infancia, un periodo de tasa de fallas constante y un periodo de envejecimiento.

Los datos necesarios para el cálculo de la tasa de fallas λ tales como las horas de operación del equipo, los parámetros de Weibull η y β , y la duración de cada periodo serán otorgados por la empresa.

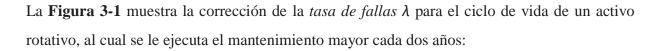
Para reflejar el efecto de la cantidad de deterioro del equipo en el comportamiento de la tasa de fallas se corrige λ según la siguiente ecuación:

$$\lambda_j = k_j \cdot \lambda_{inicial_j} \tag{Ec. 26}$$

Donde:

 k_i = Es el valor del Factor de corrección de la Salud k para cada edad del equipo.

 $\lambda_{inicial_j}$ = Es el valor de la *tasa de fallas* λ para cada edad del equipo, según su η , β y horas de operación correspondientes calculada según la ecuación **Ec. 4**.



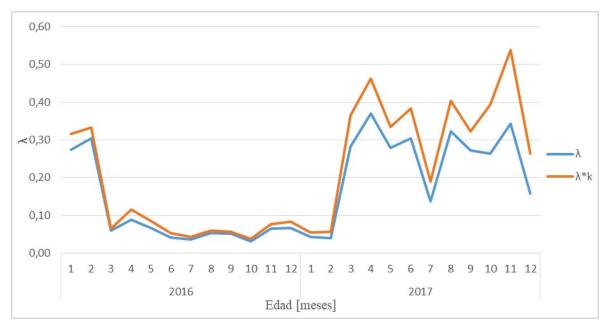


Figura 3-1: Tasa de fallas vs Tiempo

La **Figura 3-1** demuestra dos fenómenos importantes de la tendencia de la tasa de fallas de un activo:

- Si bien se logran reconocer claramente los tres periodos de funcionamiento del activo: infancia, tasa de fallas constante y envejecimiento, la tendencia de la tasa de fallas también dependerá directamente de la cantidad de horas que el equipo trabaja en cada periodo de tiempo evaluado.
- Dado que durante el periodo de envejecimiento el activo demuestra mayores niveles de deterioro, su Índice de Salud Actual se dispara y en consecuencia durante este periodo la tasa de fallas corregida aumenta mayormente en relación a la tasa de fallas inicial.

El valor de $\lambda *k$ representa la tasa de fallas corregida por el Índice de Salud, es decir, afectada por la cantidad de deterioro del equipo, su uso, carga promedio y las características de inherentes a su ubicación técnica.

3.3 Paso 3: Cálculo de Fallas Anual

Dado que la $\lambda *k$ representa la *tasa de fallas corregida* y su unidad es *fallas/hora* es necesario determinar la cantidad de fallas en el intervalo de tiempo de interés. En el caso de este estudio cada edad representa un mes calendario de operación, por lo tanto, para obtener la cantidad de fallas de cada edad del activo es necesario multiplicar la tasa de fallas corregida (obtenida en el paso anterior) por la cantidad de horas trabajadas por el equipo en cada periodo respectivamente:

$$(cantidad \ de \ fallas) = (\lambda_i \cdot k_i) \cdot t_i$$
 (Ec. 27)

Donde:

 t_i = Es la cantidad de horas trabajadas por el equipo en la edad j.

 k_j = Es el valor del Factor de corrección de la Salud "k" para la edad j.

 λ_j = Es el valor de la *tasa de fallas* λ para la edad j.

Posteriormente para determinar la cantidad de fallas anuales del equipo se suma la *cantidad de fallas* de cada edad del activo que correspondan al año que se calcula, en este caso cada edad del equipo representa un mes calendario:

Fallas anuales =
$$\sum_{k=1}^{12} (cantidad \ de \ fallas)_k$$
 (Ec. 28)

Donde:

k = 1, ..., 12 = Es un índice utilizado para los meses del año.

3.4 Paso 4: Calculo de Costos Totales por Fallas CTPF (P)

El primer paso para determinar los costos totales por fallas en un periodo determinado de tiempo (o un ciclo de vida del equipo) es determinar el costo ocasionado por los eventos de falla de cada año según la siguiente ecuación:

$$CPF_k = (Fallas\ anuales)_k * C_f$$
 (Ec. 29)

Donde:

 CPF_k = Es el valor probable de dinero que se va a necesitar para solventar los problemas por confiabilidad por los eventos de fallas en el año k.

k = 1, ..., n = Es un índice utilizado para los años.

 $(Fallas\ anuales)_k$ = Es la cantidad de fallas del año k.

 C_f = Es la cantidad de dinero asociado a solventar un evento de falla.

Finalmente para determinar los costos totales por fallas *CTPF* (*P*) en el periodo de tiempo de interés se debe calcular la sumatoria de los costos por fallas de cada año en valor presente según la siguiente ecuación:

$$CTPF(P) = \sum_{k=1}^{T} \left(CPF_k * \frac{1}{(1+i)^k} \right)$$
 (Ec. 30)

Donde:

CTPF(P) = Representa la cantidad del dinero, hoy, que se necesita para poder cubrir los gastos anuales esperados por las fallas durante T años.

k = 1, ..., n =es un contador para los años del periodo estudiado.

i = Es la tasa de interés.

3.5 Paso 5: Corrección del término Costos totales por fallas

Para aplicar la corrección de la tasa de fallas al cálculo de costos es necesario entonces corregir el término: costos totales por fallas *CTPF* (*P*) de la ecuación del Análisis de Costo de Ciclo de Vida:

$$CTPF(P) = \sum_{k=1}^{T} \left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_{jk} \cdot \left(\frac{HI}{HI_i} \right)_{jk} \cdot t_{jk} \right) \cdot C_f \cdot \left(\frac{1}{(1+i)^k} \right)$$
 (Ec. 31)

CTPF (P) =
$$\sum_{k=1}^{T} \left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_{jk} \cdot k_{jk} \cdot t_{jk} \right) \cdot C_f \cdot \left(\frac{1}{(1+i)^k} \right)$$
 (Ec. 32)

Donde:

CTPF(P) = Representa la cantidad de dinero en valor presente, que se necesita para solventar los eventos de fallas durante T años.

j = 1, ..., 12 = Es un contador para los meses de cada año del periodo evaluado.

k = 1, ..., T =Es un contador para los años del periodo evaluado.

 λ_{jk} = Es la tasa de fallas del equipo en el mes j y el año k.

 $\left(\frac{HI}{HI_i}\right)_{jk} = k_{jk}$ = Es el valor del Factor "k" para el mes j y el año k. Según su Índice de Salud Actual y su Índice de Salud Actual Inicial correspondientes.

 t_{jk} = Es el tiempo de operación del equipo en el mes j y el año k.

 C_f = Es la cantidad de dinero asociada a un evento de falla.

i = Es la tasa de interés.

3.6 Paso 6: Ecuación de Análisis de Costo de Ciclo de Vida corregida

A continuación se presenta la versión corregida de la ecuación de Análisis de Costo de Ciclo de Vida de un activo, la cual incorpora aspectos de Salud de Activos como base para estimar los costos de Confiabilidad:

$$ACCV(P) = CI + \sum_{k=1}^{T} CO \cdot (1 + IPC)^{(k-1)} \cdot \frac{1}{(1+i)^{k}}$$

$$+ \sum_{k=1}^{T} CMP \cdot (1 + IPC)^{(k-1)} \cdot \frac{1}{(1+i)^{k}}$$

$$+ \sum_{k=1}^{T} \left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_{jk} \cdot k_{jk} \cdot t_{jk} \right) \cdot C_{f} \cdot (1 + IPC)^{(k-1)} \cdot \left(\frac{1}{(1+i)^{k}} \right)$$

$$+ \sum_{k=1}^{T} CMM \cdot (1 + IPC)^{(k-1)} \cdot \left(\frac{1}{(1+i)^{k}} \right) - VR$$
(Ec.33)

Donde:

ACCV(P) = Representa la cantidad de dinero en valor presente que se necesita para solventar todos los gastos de operación de un activo durante T años.

CI = Es la inversión inicial en valor actual.

CO = Es el costo de operación del activo en valor anualizado.

CMP = Es el costo de mantenimiento preventivo del activo en valor anualizado.

 C_f = Es la cantidad de dinero asociada a solventar un evento de falla.

CMM = Es el costo de mantenimiento mayor.

VR = Es el valor residual del activo al fin de su vida útil.

 λ_{jk} = Es la tasa de fallas del equipo en el mes j y el año k.

 k_{jk} = Es el valor del Factor "k" para el mes j y el año k. Según su Índice de Salud Actual y su Índice de Salud Actual Inicial correspondientes.

 t_{jk} = Es el tiempo de operación del equipo en el mes j y el año k.

j = 1, ..., 12 = Es un contador para los meses de cada año del periodo evaluado.

k = 1, ..., T = Es un contador para los años del periodo evaluado.

IPC = Es el valor del factor de corrección del IPC en porcentaje.

Es necesario señalar que el término de la ecuación **Ec. 33** que contiene el costo de mantenimiento mayor (*CMM*) se debe contabilizar solo en los periodos en los cuales se le ejecuta el overhaul al activo de estudio.

4 ESTUDIO DE CASO: Compresor de BOG, Burckhardt Laby 2DL250B

4.1 Introducción

Como una forma de ilustrar y validar el modelo propuesto, se aplicó el cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida corregido a un compresor de BOG instalado en la planta de GNL Quintero.

El GNL (Gas natural licuado) viaja en estado líquido a -160°C en las embarcaciones que transportan este producto desde los países productores hasta el Terminal de GNL Quintero, para su almacenamiento y posterior regasificación de manera que tenga las propiedades necesarias para poder ser inyectado a la red de gasoductos que lo distribuye para abastecer la demanda de la zona central del país.

La **Figura 4-1** representa un esquema simplificado del flujo que sigue el GNL desde su recepción hasta los gasoductos:

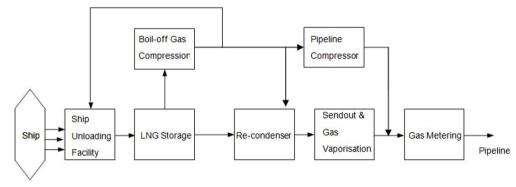


Figura 4-1: Esquema de la planta GNL Quintero. Fuente: (GNL Quintero, 2008)

En la operación normal de los estanques de la planta se produce vapor de GNL denominado BOG (siglas en ingles de *Boil off gas*) producto de la evaporación de un porcentaje del gas licuado por la absorción de calor del sistema. En tuberías y equipos también se genera BOG en menor porcentaje y ante aumentos de opresión producto de la expansión, un sistema de recolección los lleva de vuelta a los estanques de GNL.

Para controlar las presiones en los estanques producto de la generación de BOG el diseño de la planta consideró compresores de contención (Holding) con el fin de controlar la presión y enviar los vapores hacia el Recondensador (Re-condenser) para su recuperación mediante enfriamiento, convirtiéndolo nuevamente en GNL.

Durante el proceso de descarga de un buque es necesario enviar vapores de retorno al buque con el fin de compensar presiones, para esto el diseño de la planta consideró un compresor centrífugo de descarga (Unloading) que permitiera recuperar BOG de los estanques y enviarlo tanto al Recondensador como al buque.

Si durante el proceso de descarga la emisión de la planta es baja, el compresor de descarga comprime BOG que no se podrá recondensar del todo ya que no va habrá GNL suficiente disponible para el intercambio de calor en el Recondensador. Para este escenario se proyectó la incorporación de un compresor de tubería (Pipeline) que cumple la función de tomar ese BOG que no va ser recondensado, comprimirlo a presión de gasoducto e inyectarlo directamente en él.

4.2 Diseño y función del Compresor

La **Figura 4-2** representa la vista típica de un compresor Laby del tipo D:

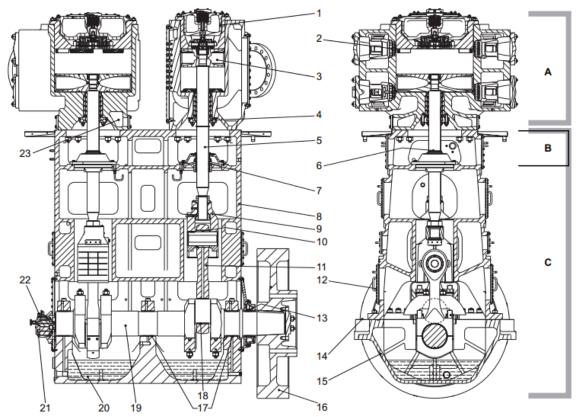


Figura 4-2: Sección transversal del Compresor Laby. Fuente: Burckhardt Compression.

Donde:

- A Cilindro
- B Espaciador
- C Engranaje del cigüeñal
- 1 Cubierta del cilindro
- 2 Válvula
- 3 Pistón
- 4 Prensaestopas del vástago del pistón
- 5 Vástago del pistón
- 6 Anillo de protección
- 7 Cojinete de guía
- 8 Bastidor
- 9 Cruceta
- 10 Cojinete de bulón de cruceta

- 11 Biela
- 12 Tapa del bastidor
- 13 Sello del cigüeñal
- 14 Perno de cimentación
- 15 Placa de base
- 16 Volante
- 17 Cojinete de cigüeñal
- 18 Cojinete de biela
- 19 Cigüeñal
- 20 Colador de aceite
- 21 Bomba de aceite de engranajes
- 22 Manómetro
- 23 Barrera térmica

El compresor Laby tiene un diseño completamente sellado y hermético, libre fugas de gas de proceso hacia la atmosfera. El gas de proceso, en este caso metano (CH₄), se comprime a la presión requerida mediante dos fases de compresión de doble acción. Puesto que el gas no se debe contaminar en el proceso, el compresor Laby tiene la particularidad de contar con pistones laberinticos (3) desarrollados por Burckhardt Compression AG los cuales permiten el sellado sin contacto entre pistón y la pared del cilindro, de manera que el proceso de compresión está libre de lubricación por aceite.

La **Figura 4-3** muestra un esquema simplificado de las distintas secciones del compresor Laby y los distintos flujos de fluidos que forman parte de su operación:

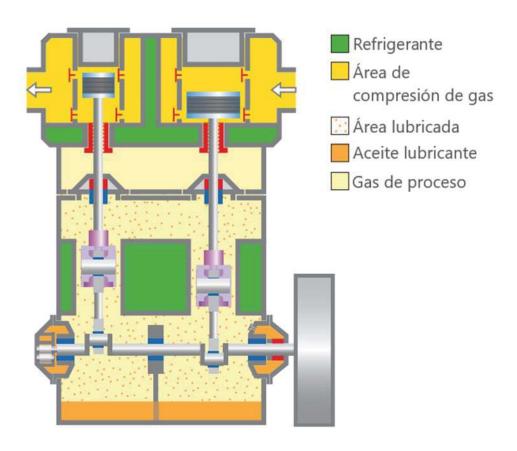


Figura 4-3: Esquema del Compresor Laby. Fuente: Burckhardt Compression.

Las válvulas (2) están situadas en los cilindros (A), posicionadas mediante las linternas y las tapas de válvula. Las válvulas se aspiración y de descarga garantizan el suministro de gas a las fases individuales.

El prensaestopas para el vástago del pistón (4) tiene una pequeña fuga de gas causada por su método de funcionamiento sin contacto. La pieza entre la cruceta y el cojinete de guía esta lubricada mediante espray. El rascador de aceite dentro del cojinete de guía elimina el aceite del vástago del pistón y evita que éste entre en el espaciador (B).

El anillo de protección (6) instalado en el vástago del pistón separa el área con lubricación de aceite inferior respecto del área sin lubricación superior.

La rotación del cigüeñal (19) se transforma mediante la biela (11) en un movimiento oscilante de la cruceta (9). El vástago del pistón (5) está conectado a la cruceta. La cruceta y el cojinete de guía (7) mantienen el movimiento lineal preciso del pistón para el sistema de sellado laberíntico.

Para la refrigeración del cilindro y del área de cruceta se utiliza el refrigerante apropiado.

El cigüeñal (19) está fijado a la placa base (15) mediante cojinetes (17). En el extremo de accionamiento del engranaje del cigüeñal se ha acoplado u volante (16) al cigüeñal. El volante compensa una carga desigual del compresor al motor.

En el extremo de no accionamiento, la bomba de aceite de engranajes accionada por el cigüeñal (21) garantiza la lubricación de cojinetes y crucetas durante el funcionamiento del compresor.

El compresor está anclado a la cimentación mediante pernos de cimentación (14).

4.3 Cálculo del Índice de Salud de Activos

4.3.1 Vida Normal Estimada

Para abordar el primer paso de la metodología se presentan los principales datos del equipo a analizar en la **Tabla 4-1**:

Nombre	Holding A
Categoría	Compresor
Sub-categoría	Reciproco, de dos etapas y doble acción
TAG del equipo	300-K-101A
Vida normal estimada [horas]	9000
Carga en el punto de garantía [kW]	564
Carga máxima admisible [kW]	690
Uso anual [horas]	~4380

Tabla 4-1: Datos operativos Compresor Holding A.

4.3.2 Vida Estimada

Para calcular la vida estimada se determinó el Factor de Emplazamiento (F_E) del equipo según las características inherentes a su ubicación técnica. Los valores de cada uno de los factores de emplazamiento se resumen en la **Tabla 4-2**:

	FACTORES DE EMPLAZAMIENTO						
0	Categoría	0 - 1 Km	1 Km - 5 Km	5 - 10 Km	10 - 20 Km	> 20 Km	
1	Distancia a la costa	1,2	1,15	1,1	1,05	1	

0	Categoría	exterior	interior
2	Situación exterior/interior	1,2	1

0	Categoría	0°C - 10°C	10°C - 20°C	20°C - 30°C	> 30°C
3	Promedio de temperatura	1	1,05	1,1	1,15
0	Categoría	0 - 500 [m]	500 - 1000 [m]	1000 - 2000 [m]	> 2000 [m]
4	Altura con respecto al nivel del mar	1	1,1	1,2	1,3
0	Categoría	no	sí		
5	Exposición a polvo en suspensión	1	1,2		

Tabla 4-2: Referencia de los Factores de Emplazamiento.

6 Exposición a atmósfera corrosiva

Dado que el equipo se encuentra situado en el exterior, el valor del Factor de Emplazamiento (F_E) se calcula según la ecuación **Ec. 16.** El compresor está situado en la planta de GNL Quintero, aproximadamente a cien metros del mar, en una atmósfera altamente corrosiva, el promedio de temperatura anual es aproximadamente 20° C y se encuentra bajo un galpón abierto, por lo tanto, se estima que el valor de F_{SEI} tomara el valor medio 1,1. Los valores de cada uno de los factores de emplazamiento se resumen en la **Tabla 4-3**:

	Factores de emplazamiento, Compresor Holding A						
N°	Categoría	Factor	Valor				
1	Distancia a la costa	F_{DC}	1,2				
2	Situación exterior/interior	F_{SEI}	1,1				
3	Promedio de temperatura	F_{T}	1,05				
4	Altura con respecto al nivel del mar	F _A	1				
5	Exposición a polvo en suspensión	F_{PS}	1				
6	Exposición a atmósfera corrosiva	F_{AT}	1,2				

Tabla 4-3: Factores de emplazamiento, Compresor Holding A.

Luego el valor del Factor de Emplazamiento (F_E) se calcula según la ecuación **Ec. 16**:

$$F_E = \max(F_{DC}, F_{SEI}, F_T, F_A, F_{PS}, F_{AT}) = 1,2$$
 (Ec. 16)

El Factor de Carga (F_C) se calcula a través la ecuación **Ec. 17**, según la carga en el punto de garantía y la carga máxima admisible del equipo:

$$F_C = \frac{Carga\ en\ el\ punto\ de\ garantía}{Carga\ máxima} = \frac{564}{690} = 0.817$$

Finalmente la Vida estimada del compresor se calcula con la ecuación Ec. 18:

$$Vida\ estimada = \frac{Vida\ normal\ estimada}{F_E \cdot F_C} = \frac{9000}{1,2*0,817} = 9175,5\ [horas]$$

4.3.3 Tasa de Envejecimiento

Para calcular la tasa de envejecimiento del equipo se utiliza la ecuación Ec. 19:

$$\Phi = \frac{\ln\left(\frac{HI_{vida\ estimada}}{HI_{nuevo}}\right)}{Vida\ estimada} = \frac{\ln\left(\frac{5,5}{0,5}\right)}{9175,5} = 0,0002613$$

4.3.4 Índice de Salud Actual Inicial

El Índice de Salud Actual Inicial se calcula según la ecuación **Ec. 20**, la variable *tiempo* "t" en la ecuación de Salud Actual Inicial corresponde al tiempo transcurrido registrado por la empresa desde la primera puesta en marcha del equipo después de un overhaul. Como se menciona anteriormente cada edad registrada corresponde a un mes calendario de operación, contabilizando las horas trabajas hasta el final de su ciclo de vida, es decir, hasta que el compresor nuevamente se pone fuera de servicio para su overhaul.

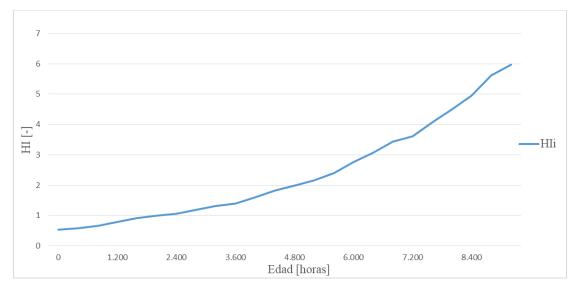


Figura 4-4: HI_i vs Tiempo, Compresor Holding A. Fuente: Autor

La **Figura 4-4** representa la tendencia exponencial del Índice de Salud Actual Inicial del compresor Holding A, dada su vida estimada calculada según un Factor de Emplazamiento y Factor de Carga inherentes a su ubicación técnica.

4.3.5 Índice de Salud Actual

4.3.5.1 Modificadores de Salud y Confiabilidad del Compresor Holding A

Para calcular el Índice de Salud del compresor es necesario hacer un vasto estudio de todas las características de los componentes mecánicos del equipo, aspectos relevantes en su operación, recopilar información de los análisis, test y mantenimientos realizados por la empresa, como también los modos de falla con el objetivo de diseñar Modificadores de Salud y Modificadores de Confiabilidad que representen con precisión el deterioro real del equipo en el Índice de Salud calculado.

A continuación se exponen cada uno de los **Modificadores de Salud** que se aplicaron en el cálculo del Índice de Salud para el compresor Holding A:

- Termografía: La termografía es una técnica que permite ver la temperatura de una superficie con precisión, sin tener ningún contacto con ella. En este caso es un procedimiento aplicado en los motores eléctricos y conexiones de media tensión y su fin es detectar puntos calientes donde podría haber roce excesivo, daño de rodamiento y potenciales cortocircuitos.
- Fuga de refrigerante: La segunda etapa de compresión del compresor Laby es refrigerada
 mediante un sistema cerrado de agua, las pérdidas de refrigerante pueden mermar la
 capacidad del equipo de rechazar calor y por ende dañar tempranamente componentes
 tales como el pistón laberintico, la camisa del pistón y las válvulas de aspiración y escape
 de la segunda etapa de compresión.
- Fuga de lubricante: El compresor tiene un sistema cerrado de aceite que garantiza la lubricación de cojinetes y crucetas durante su funcionamiento. La lubricación es vital ya que impide que las superficies tengan contacto metal-metal. La fuga de lubricante puede ser ocasionada por el deterioro o mal estado de los siguientes elementos: Juntas tóricas en los extremos del cigüeñal, anillos de presión y de estanqueizado, acanaladuras en el cigüeñal, anillos rascadores de aceite, vástago del pistón, gomas rígidas y quebradizas.
- Número de puestas en marcha: Dado que el compresor Laby es una máquina rotativa de gran escala, cada puesta en marcha implica sacar del reposo todos los componentes y vencer la inercia total del conjunto. Cada partida significa un desgaste por tensión en los

componentes del equipo, tales como: motor eléctrico, cigüeñal, bielas, crucetas, vástago y cojinetes.

- Vibraciones: El exceso de vibraciones puede dañar los componentes mecánicos del equipo. La presencia de vibraciones puede evidenciar daño, el mal montaje de algún componente, soltado de conexiones o deterioro de partes, tales como: cojinetes del cigüeñal y/o biela, bulón de cruceta, agripado del pistón, rotura u holgura inadecuada de las válvulas de aspiración y/o descarga.
- Análisis de aceite: El análisis de aceite es un conjunto de procedimientos y mediciones aplicadas al lubricante usado en el equipo para controlar el estado del lubricante como también de manera indirecta establecer el estado de los componentes internos mediante la medición de la cantidad de metales de desgaste presentes en el aceite, contaminación, conteo de partículas, entre otros.

Los Modificadores de Salud manifiestan distintos aspectos de la condición del activo, por lo tanto, es necesario ponderar el peso de cada uno en el Índice de Salud como también determinar los distintos escenarios de deterioro posibles que deben reflejar, los valores de cada modificador para los distintos escenarios se presentan en la **Tabla 4-4**:

	Modificadores de Salud, Compresor Holding A							
N°	Categoría	No es evidente	Mayor de lo normal	Sobre el máximo				
1	Termografía	1	1,1	1,2				

N°		Categ	goría		Menos de 40	40 - 80	80 a 120	> 120
	Número	de	puestas	en				
2	marcha				1	1,1	1,15	1,2

N°	Categoría	Bueno	Seguimiento	Alerta	Peligro
3	Vibraciones	1	1,1	1,2	1,25

N°	Categoría	Sin fuga	Leve	Fuga excesiva
4	Fugas de lubricante	1	1,05	1,1
5	Fuga de refrigerante	1	1,05	1,1

N°	Categoría	Satisfactorio	Seguimiento	No satisfactorio
6	Análisis de aceite	1	1,2	1,3

Tabla 4-4: Modificadores de Salud, Compresor Holding A.

Los valores de los **Modificadores de Confiabilidad** aplicados al cálculo del índice de salud del equipo se resumen en la **Tabla 4-5**:

	Modificadores de Confiabilidad, Compresor Holding A								
N°	Categoría	de 0 a 3	de 3 a 5	más de 5					
1	Número de overhauls	1	1,05	1,1					

N°	Categoría	0% - 50%	50% - 75%	75% - 100%
2	% de inactividad	1	1,05	1,1

N°	Categoría		En la media	Inferior a la media	Superior a la media
	Confiabilidad con respecto	al			
3	promedio		1	1,05	1

Tabla 4-5: Modificadores de Confiabilidad, Compresor Holding A.

Definidos los valores de los **Modificadores de Salud y Confiabilidad** se puede calcular el Índice de Salud Actual del equipo dadas las siguientes suposiciones:

- El cálculo simula las condiciones de operación de GNL Quintero, es decir, el equipo trabaja aproximadamente 9500 horas en un periodo de dos años.
- El equipo comienza a operar después de un overhaul, por lo tanto, se asume que el estado del mismo será como nuevo (as good as new), en consecuencia, todos los modificadores comienzan desde el valor "1".
- Cada edad registrada representa un mes calendario de funcionamiento del equipo, es
 decir, el cambio de cada uno de los modificadores se registrará mensualmente y el valor
 de la variable "tiempo" corresponde al acumulado de las horas trabajadas mensualmente.
- Se asumió que los Modificadores: Vibraciones, Fuga de aceite y Fuga de refrigerante empeoran en el tiempo. Los modificadores: Termografía, Número de puestas en marcha y Análisis de aceite se basaron en el historial recopilado.
- El Modificador de Confiabilidad: Porcentaje de Inactividad, se calculó según el historial recopilado.
- El Modificador de Carga se calculó según la carga promedio registrada en cada edad del activo, obtenida del historial recopilado.

La **Figura 4-5** representa gráficamente la influencia de los distintos factores que afectan la vida del compresor: En marrón los factores de emplazamiento, estos factores afectan negativamente la salud del compresor, acortando la vida estimada del equipo. En gris, los factores operacionales, dado que a mayor carga de trabajo se acelera la tasa de deterioro del equipo. En verde los Modificadores de Salud, la evidencia de estos factores penaliza el Índice de Salud. En azul los Modificadores de Confiabilidad que penalizan el Índice de Salud según la variación de la Confiabilidad del equipo.

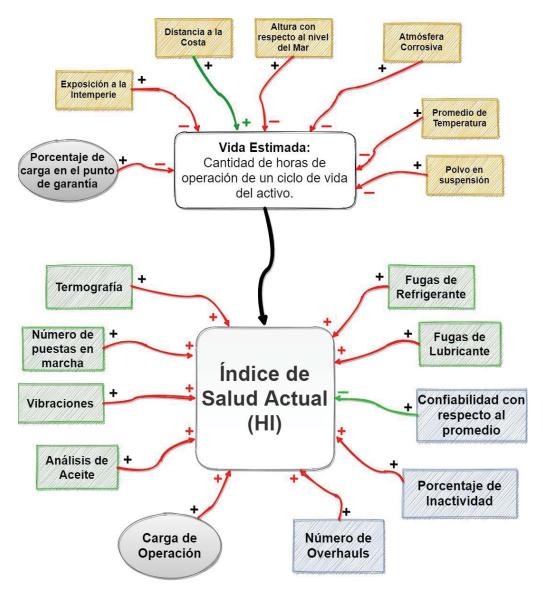


Figura 4-5: Diagrama de Influencias. Compresor Holding A. Fuente: Autor.

La **Figura 4-5** muestra la tendencia exponencial del Índice de Salud Actual (*HI*) calculado según la ecuación **Ec. 21**, en otras palabras, el valor del Índice de Salud corregido por la aplicación de los distintos factores que reflejan deterioro en el equipo. La metodología de cálculo de Índice de Salud de Activos aplicada al compresor de estudio de presenta gráficamente en el **Anexo 8.8 Mapa Conceptual: Metodología de Cálculo de Índice de Salud.**

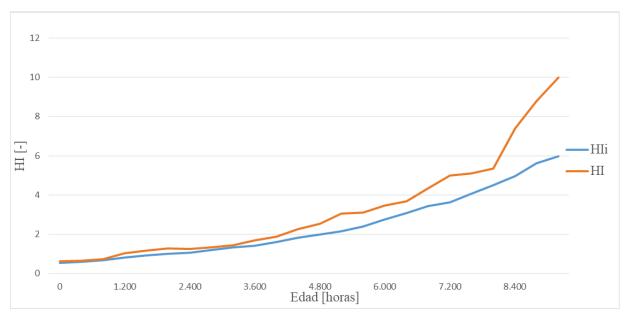


Figura 4-6: Índice de Salud Actual vs Tiempo, Compresor Holding A. Fuente: Autor.

4.3.6 Cálculo de la Tasa de Fallas corregida

Para calcular la tasa de fallas se utiliza la ecuación **Ec. 4** presentada en la sección Indicadores de Confiabilidad de la distribución de Weibull. Se calculó la tasa de fallas para cada edad del equipo utilizando sus parámetros de Weibull, que son datos proporcionados por GNL Quintero y se resumen en la **Tabla 4-6**:

Item	Infancia	Tasa constante	Envejecimiento
Rango (horas)	0-1000	1000-6000	>6000
η	1068	7680	1806
β	0,9	1	1,1

Tabla 4-6: Parámetros de Weibull del Compresor Holding A.

Para calcular la tasa de fallas corregida se determinó el valor del Factor de corrección de la Salud (k) de cada edad del equipo como se describe en la ecuación **Ec.25** mencionada en el Desarrollo del Modelo. Se determinó la tasa de fallas corregida $(\lambda *k)$ para cada edad del equipo con la ecuación **Ec. 26**. La siguiente tabla muestra los valores obtenidos para el Factor de corrección (k) y la tasa de fallas corregida $(\lambda *k)$ para un ciclo de vida del equipo o veinticuatro meses de operación:

Edad	HI_{i}	HI	k	λ	λ*k
[mes-año]	[-]	[-]	[-]	[fallas/hora]	[fallas/hora]
ene-16	0,54	0,62	1,16	0,000962	0,001112
feb-16	0,59	0,65	1,10	0,000889	0,000975
mar-16	0,67	0,72	1,08	0,000130	0,000140
abr-16	0,80	1,02	1,29	0,000130	0,000168
may-16	0,91	1,16	1,27	0,000130	0,000165
jun-16	0,99	1,28	1,30	0,000130	0,000169
jul-16	1,07	1,23	1,16	0,000130	0,000151
ago-16	1,19	1,33	1,12	0,000130	0,000146
sept-16	1,32	1,43	1,09	0,000130	0,000142
oct-16	1,40	1,68	1,20	0,000130	0,000157
nov-16	1,60	1,88	1,18	0,000130	0,000153
dic-16	1,83	2,25	1,23	0,000130	0,000161
ene-17	1,99	2,53	1,27	0,000130	0,000165
feb-17	2,16	3,06	1,42	0,000130	0,000185
mar-17	2,40	3,11	1,29	0,000687	0,000889
abr-17	2,76	3,46	1,25	0,000693	0,000868
may-17	3,06	3,68	1,20	0,000697	0,000837
jun-17	3,43	4,33	1,26	0,000701	0,000884
jul-17	3,61	4,98	1,38	0,000703	0,000968
ago-17	4,07	5,09	1,25	0,000707	0,000884
sept-17	4,50	5,34	1,19	0,000710	0,000843
oct-17	4,96	7,39	1,49	0,000713	0,001063
nov-17	5,62	8,80	1,57	0,000717	0,001124
dic-17	5,96	9,98	1,67	0,000719	0,001204

Tabla 4-7: Valores del factor k y tasa de fallas corregida $\lambda * k$, Compresor Holding A

Utilizando la ecuación **Ec. 27** se obtuvo la *cantidad de fallas* para cada edad del equipo según la cantidad de horas trabajadas en cada edad correspondiente, y finalmente a través de la ecuación **Ec. 28** la cantidad de *Fallas anuales*. La **Tabla 4-8** muestra los valores calculados:

Año	Edad (i)	$\lambda_i^* \mathbf{k_i}$	Horas Trabajadas (t _i)	$(\lambda_i * k_i) * t_i$	Fallas Anuales	
[Año]	[mes-año]	[fallas/hora]	[horas]	[fallas/mes]	[fallas/año]	
	ene-16	0,001112	284	0,273197		
	feb-16	0,000975	342	0,303815		
	mar-16	0,000140	466	0,060664		
	abr-16	0,000168	686	0,089345		
	may-16	0,000165	517	0,067300		
2016	jun-16	0,000169	318	0,041460	1 2	
2010	jul-16	0,000151	281	0,036625	1,3	
	ago-16	0,000146	410	0,053385		
	sept-16	0,000142	397	0,051664		
	oct-16	0,000157	240	0,031250		
	nov-16	0,000153	499	0,064935		
	dic-16	0,000161	517	0,067285		
	ene-17	0,000165	332	0,043213		
	feb-17	0,000185	306	0,039800		
	mar-17	0,000889	410	0,281761		
	abr-17	0,000868	533	0,369212		
	may-17	0,000837	399	0,278175		
2017	jun-17	0,000884	434	0,304532	2 0	
2017	jul-17	0,000968	196	0,138048	3,8	
	ago-17	0,000884	456	0,322511		
	sept-17	0,000843	383	0,271766		
	oct-17	0,001063	371	0,264414		
	nov-17	0,001124	478	0,342976		
	dic-17	0,001204	219	0,157147		

Tabla 4-8: Calculo de fallas anuales, Compresor Holding A.

Dado que el valor que representa la cantidad de eventos de fallas del equipo debe ser un número entero, en este caso los valores *Fallas anuales* obtenidos se redondearon al entero más cercano, entonces, históricamente el Compresor Holding A tuvo una falla durante el año 2016 y cuatro fallas durante el año 2017.

4.3.7 Análisis de Costo de Ciclo de Vida. Compresor Holding A

En la **Tabla 4-9** se resumen los valores de los costos utilizados para realizar un Análisis de Costo de Ciclo de Vida del equipo:

Costos de operación, Compresor Holding	A (\$USD)
Costo operacional anualizado	\$224.935
Costos de mantenimiento preventivo anualizado	\$5.180
Costo de mantenimiento mayor	\$20.000
Costo de la falla	\$2.000

Tabla 4-9: Costo de operación, Compresor Holding A.

Para realizar un cálculo de costo de ciclo de vida del Compresor Holding A como se describe en la Sección 2.2.3 Cálculo de ACCV, se utilizó una estructura de flujo de caja en el cual los costos serán corregidos anualmente por el IPC (Índice de Precios al Consumidor). Cada una de las categorías de costos deben ser expresadas en valor presente, por lo que se utilizó la ecuación del VAN (Valor Actual Neto) para calcular la cantidad de dinero – hoy, que necesita para cubrir todos los costos operacionales del equipo durante un periodo de diez años. El flujo de caja de este ejemplo se encuentra en el Anexo 8.2 Flujo de Caja: Compresor Holding A. Caso Teórico.

4.4 Aplicación del Modelo

4.4.1 Introducción

El propósito de este estudio es hacer una evaluación económica de los OPEX asociados al funcionamiento del activo durante un periodo de 10 años, específicamente desde el año 2016 hasta el año 2025 calculando los costos asociados a problemas por Confiabilidad según el modelo matemático propuesto, es decir, basando la tasa de fallas en la cantidad el deterioro del equipo cuantificado por el Índice de Salud.

Para concretar el propósito se plantearon seis hipótesis a evaluar, las cuales buscan reflejar el cambio en los costos totales por fallas variando el criterio de overhaul del equipo como también planteando el caso de un procedimiento de overhaul económico pero menos eficiente.

Cada una de las hipótesis se calculó siguiendo la metodología propuesta anteriormente y se describen a continuación:

- Hipótesis 1: Caso Teórico: El overhaul se ejecuta cada 9500 horas de trabajo y este retorna el equipo a su condición como nuevo. Este caso simula la operación real del equipo en GNL Quintero y será la base de comparación de este estudio.
- **Hipótesis 2: Overhaul Económico:** El overhaul se ejecuta cada 9500 horas, el overhaul es más económico pero menos eficiente, el equipo no retorna a su condición como nuevo.
- **Hipótesis 3: Criterio de Overhaul HI=5,5:** El overhaul se ejecuta cuando el valor del Índice de Salud toma el valor máximo HI=5,5.
- **Hipótesis 4: Criterio de Overhaul HI=4,0:** El overhaul se ejecuta cuando el valor del Índice de Salud toma el valor máximo HI=4,0.
- Hipótesis 5: Criterio de Overhaul HI=5,5 y Overhaul Económico: El overhaul se ejecuta cuando el valor del Índice de Salud toma el valor máximo HI=5,5 y el overhaul es más económico pero menos eficiente, el equipo no retorna a su condición como nuevo.
- Hipótesis 6: Criterio de Overhaul HI=4,0 y Overhaul Económico: El overhaul se ejecuta cuando el valor del Índice de Salud toma el valor máximo HI=4,0 y el overhaul es más económico pero menos eficiente, el equipo no retorna a su condición como nuevo.

4.4.2 Hipótesis 1: Caso Teórico

En esta hipótesis se simula el uso real del compresor según las condiciones de operación de GNL Quintero:

- El procedimiento de overhaul retornará el equipo a su condición como nuevo (*as good as new*), por lo tanto, todos los modificadores de salud retornan a su valor más bajo después de cada overhaul y empeoran en el tiempo.
- El procedimiento de overhaul se hace cada dos años o aproximadamente 9500 horas de operación.

La **Figura 4-7** demuestra la variación de *HI* para el caso teórico, cada overhaul se ve representado por la caída de *HI* después de tomar su valor máximo *HI*=10,46. Dado que el overhaul de hace cada dos años cronológicos en este caso existen 5 procedimientos de overhaul.

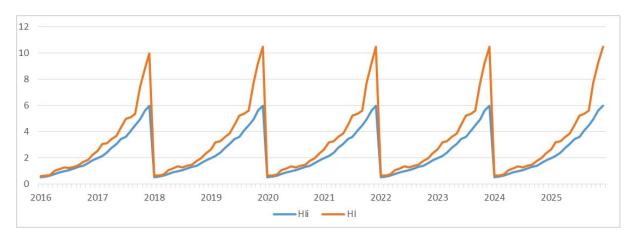


Figura 4-8: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 1.

La **Figura 4-8** muestra la variación de la *tasa de fallas corregida* $\lambda *k$ en el tiempo, en este caso el equipo opera en el periodo de infancia durante las primeras mil horas de trabajo, el periodo de tasa de fallas constante ocurre desde las mil horas hasta las seis mil horas de trabajo, desde las seis mil horas hasta el final de su vida útil ocurre el periodo de envejecimiento y la tasa de fallas aumenta.

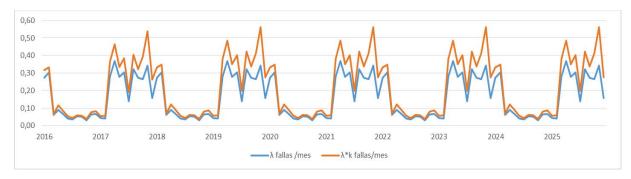


Figura 4-9: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 1.

El detalle del cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida para esta hipótesis se encuentra en el Anexo 8.2 Flujo de Caja: Compresor Holding A, Caso Teórico.

4.4.3 Hipótesis 2: Overhaul Económico

En esta hipótesis se simula el uso real del compresor según las condiciones de operación de GNL Quintero y el procedimiento de overhaul es menos eficiente pero más económico que el tradicional:

- El procedimiento de overhaul no retornará al equipo a su condición como nuevo (as good as new), por lo tanto, todos los modificadores de salud retornan a un valor medio después de cada overhaul y empeoran en el tiempo.
- El procedimiento de overhaul se hace cada dos años o aproximadamente 9500 horas de operación.
- El procedimiento de overhaul tendrá un costo 50% menor que el tradicional.

La **Figura 4-9** demuestra la variación de HI para el caso 2, cada overhaul se ve representado por la caída de HI después de tomar su valor máximo HI=19,67. Dado que el overhaul de hace cada dos años cronológicos en este caso existen 5 procedimientos de overhaul.

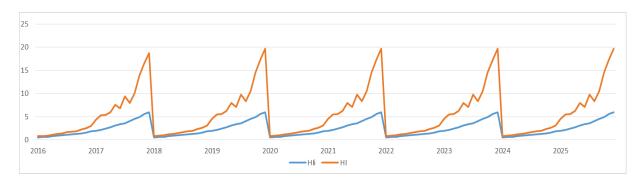


Figura 4-10: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 2.

La **Figura 4-10** muestra la variación de la *tasa de fallas corregida* λ^*k en el tiempo. Dado que en este caso los valores de los modificadores de salud llegan a su peor condición hacia el final de la vida del equipo el valor de HI se dispara, y por ende la tasa de fallas.

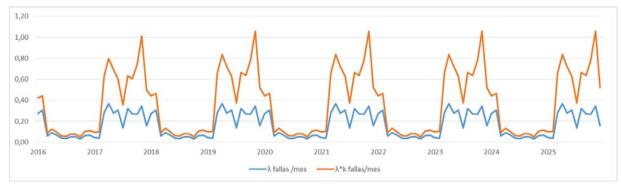


Figura 4-11: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 2.

El detalle del cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida para esta hipótesis se encuentra en el Anexo 8.3 Flujo de Caja: Compresor Holding A, Overhaul Económico.

4.4.4 Hipótesis 3: Criterio de overhaul HI=5,5

En esta hipótesis se simulará una situación donde el overhaul se ejecutará cuando el valor del Índice de Salud tome un valor máximo igual a HI=5,5:

- El procedimiento de overhaul dejará el equipo en su condición como nuevo (*as good as new*), por lo tanto, todos los modificadores de salud retornan a su valor más bajo después de cada overhaul y empeoran en el tiempo.
- El procedimiento de overhaul se hace cuando el valor del índice de salud tome un valor máximo HI=5,5.

La **Figura 4-11** demuestra la variación de *HI* para la Hipótesis 3, cada overhaul se ve representado por la caída de *HI* después de tomar *HI*=5,5. En este caso se hacen cinco procedimientos de overhaul en el periodo de diez años, aproximadamente cada veintiún meses de operación o 8400 horas de trabajo.

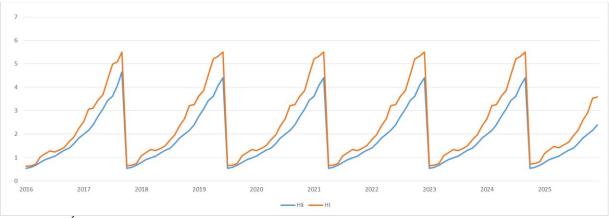


Figura 4-13: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 3.

La **Figura 4-12** muestra la variación de la *tasa de fallas corregida* λ^*k en el tiempo. En este caso el valor de la tasa de fallas disminuye con respecto al caso teórico dado que el overhaul se adelanta tres meses acortando el periodo de envejecimiento del equipo, tiempo en el que la tasa de fallas llega a su máximo valor.

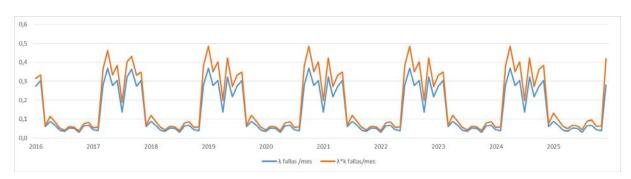


Figura 4-12: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 3.

El detalle del cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida para esta hipótesis se encuentra en el Anexo 8.4 Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI=5,5.

4.4.5 Hipótesis 4: Criterio de overhaul HI=4,0

En esta hipótesis se simulará una situación donde el overhaul se ejecutará cuando el valor del Índice de Salud tome un valor máximo igual a HI=4,0:

- El procedimiento de overhaul dejará el equipo en su condición como nuevo (*as good as new*), por lo tanto, todos los modificadores de salud retornan a su valor más bajo después de cada overhaul y empeoran en el tiempo.
- El procedimiento de overhaul se hace cuando el valor del índice de salud tome un valor máximo HI=4,0.

La **Figura 4-13** demuestra la variación de HI para el caso 4, cada overhaul se ve representado por la caída de HI después de tomar su valor máximo HI=4,0. En este caso se hacen siete procedimientos de overhaul en el periodo de diez años, aproximadamente cada diecisiete meses de operación o 7100 horas de trabajo.

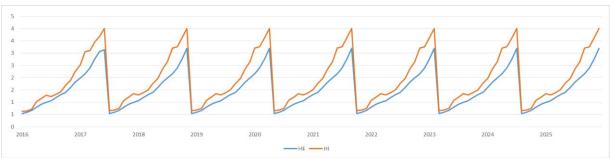


Figura 4-14: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 4.

La **Figura 4-14** muestra la variación de la *tasa de fallas corregida* λ^*k en el tiempo. En este caso el valor de la tasa de fallas disminuye con respecto al caso teórico dado que el overhaul se adelanta siete meses, en cada ciclo de vida el equipo opera solo cuatro meses en su periodo de envejecimiento.

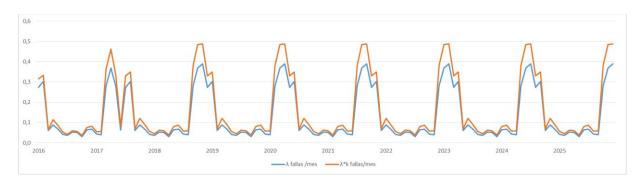


Figura 4-15: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 4.

El detalle del cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida para esta hipótesis se encuentra en el **Anexo 8.5 Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI=4,0.**

4.4.6 Hipótesis 5: Criterio de overhaul HI=5,5 y Overhaul Económico

En esta hipótesis se simulará una situación donde el overhaul se ejecutará cuando el valor del índice de salud tome un valor máximo igual a HI=5,5 y el procedimiento de overhaul es menos eficiente pero más económico que el tradicional:

- El procedimiento de overhaul no retornará al equipo a su condición como nuevo (as good as new), por lo tanto, todos los modificadores de salud retornan a un valor medio después de cada overhaul y empeoran en el tiempo.
- El procedimiento de overhaul se hace cuando el valor del índice de salud tome un valor máximo HI=5,5.
- El procedimiento de overhaul tendrá un costo 50% menor que el tradicional.

La **Figura 4-15** demuestra la variación de *HI* para el caso 5, cada overhaul se ve representado por la caída de *HI* después de tomar su valor máximo *HI*=5,5. En este caso se hacen ocho procedimientos de overhaul en el periodo de diez años, aproximadamente cada catorce meses de operación o 5600 horas de trabajo.

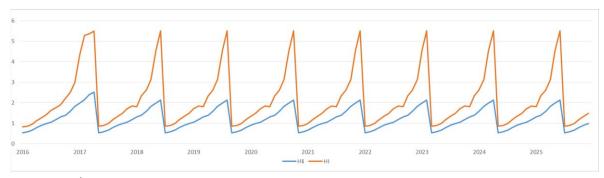


Figura 4-16: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 5.

La **Figura 4-16** muestra la variación de la *tasa de fallas corregida* λ^*k en el tiempo. En este caso el valor de la tasa de fallas anual disminuye con respecto al caso teórico dado que el overhaul se adelanta diez meses en consecuencia del rápido incremento del índice de salud. En este caso el equipo alcanza su periodo de envejecimiento solo en el primer ciclo de vida y luego la tasa de fallas aumenta solo debido al periodo de infancia después de cada overhaul.

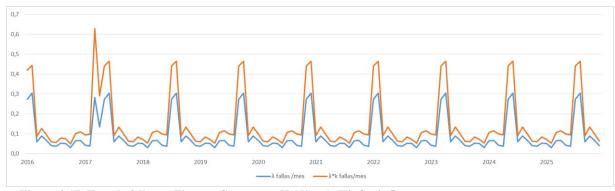


Figura 4-17: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 5.

El detalle del cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida para esta hipótesis se encuentra en el Anexo 8.6 Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI=5,5 y Overhaul Económico.

4.4.7 Hipótesis 6: Criterio de overhaul HI=4,0 y Overhaul Económico

En esta hipótesis se simulará una situación donde el overhaul se ejecutará cuando el valor del Índice de Salud tome un valor máximo igual a 4,0 y el procedimiento de overhaul es menos eficiente pero más económico que el tradicional:

- El procedimiento de overhaul no retornará el equipo a su condición como nuevo (as good as new), por lo tanto, todos los modificadores de salud retornan a un valor medio después de cada overhaul y empeoran en el tiempo.
- El procedimiento de overhaul se hace cuando el valor del índice de salud tome un valor máximo 4,0.
- El procedimiento de overhaul tendrá un costo 50% menor que el tradicional.

La **Figura 4-17** demuestra la variación de *HI* para el caso 6, cada overhaul se ve representado por la caída de *HI* después de tomar su valor máximo *HI=4,0*. En este caso se hacen nueve procedimientos de overhaul en el periodo de diez años, aproximadamente cada trece meses de operación o 4700 horas de trabajo.

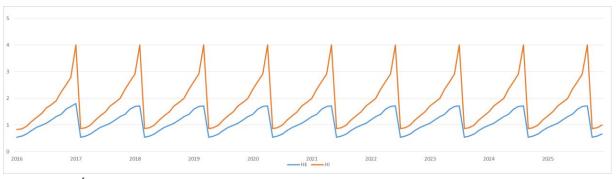


Figura 4-18: Índice de Salud vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 6.

La **Figura 4-18** muestra la variación de la *tasa de fallas corregida* λ^*k en el tiempo. En este caso el valor de la tasa de fallas anual disminuye con respecto al caso teórico dado que el overhaul se adelanta once meses en consecuencia del rápido incremento del índice de salud. En este caso el equipo no alcanza su periodo de envejecimiento, luego la tasa de fallas aumenta solo durante el periodo de infancia después de cada overhaul.

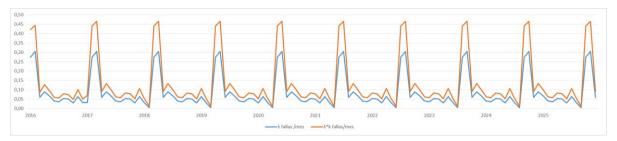


Figura 4-19: Tasa de fallas vs Tiempo, Compresor Holding A, Hipótesis 6.

El detalle del cálculo de Análisis de Costo de Ciclo de Vida para esta hipótesis se encuentra en el Anexo 8.7 Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI=4,0 y Overhaul Económico.

4.4.8 Análisis de los Resultados

Para poder comparar los resultados obtenidos se realizó un análisis de los costos operacionales (OPEX) de cada hipótesis planteada, la **Tabla 4-10** muestra el valor actual neto (VAN) de los costos operacionales para cada caso, en otras palabras la cantidad de dinero – hoy, que se necesita para poder cubrir todos los gastos asociados al equipo durante su operación en el periodo evaluado: costos operacionales, costos de mantenimiento preventivo, costos de mantenimiento mayor y costos asociados a eventos de falla.

N°	Hipótesis de estudio	Fallas totales	N° Overhauls	VAN
1	Caso Teórico	25	5	USD 1.360.097
2	Overhaul Económico	45	5	USD 1.355.451
3	Criterio de overhaul HI=5,5	20	5	USD 1.356.981
4	Criterio de overhaul HI=4,0	19	7	USD 1.369.180
5	HI=5,5 y Overhaul económico	20	8	USD 1.345.885
6	HI=4,0 y Overhaul económico	20	9	USD 1.349.818

Tabla 4-10: Resumen de los resultados obtenidos.

En GNL Quintero los compresores Holding son equipos de criticidad media y la ocurrencia de fallas no compromete la continuidad operacional de la planta, por lo tanto, el costo asociado a los eventos de fallas no incluye penalizaciones por indisponibilidad de producción o *downtime* y será asociado solamente a los costos de mano de obra, por ende, tienen un bajo impacto en el cálculo económico total.

Dado lo anterior se puede explicar el resultado de la **Hipótesis** N°2, si bien la tasa de fallas se dispara y la cantidad de fallas totales es casi el doble que el caso teórico, el resultado es similar, ya que el costo asociado a esas fallas no es mayor a la cantidad de dinero ahorrado al ejecutar procedimientos de overhaul económico.

La **Hipótesis** N°4 tiene el valor más alto obtenido, en este caso al adelantar el overhaul se obtiene la mínima cantidad de fallas, seis por debajo del caso teórico, sin embargo, la cantidad de dinero adicional que se gastará en overhauls es mucho mayor al dinero ahorrado por eventos de falla.

En la **Hipótesis** N°3 al adelantar el mantenimiento mayor se logra disminuir la cantidad de fallas totales, no obstante, dado que el valor de los costos por fallas no tiene un gran impacto se llega a un resultado muy cercano al caso teórico.

Las **Hipótesis** N°5 y N°6 obtienen los valores más bajos, esto se explica por el hecho de que en ambos casos se disminuye la tasa de fallas y en consecuencia la cantidad total de fallas. En vista de que se adelanta el overhaul de manera considerable, en ambas hipótesis el equipo no llega a su periodo de envejecimiento y la tasa de fallas aumentará solo durante un breve periodo de infancia después de cada overhaul. Si bien ambas hipótesis tiene una cantidad elevada de overhauls, los costos asociados a estos serán menores que el caso teórico por el hecho de ser económicos.

5 COMPARACIÓN CON UN MODELO TRADICIONAL DE LCC

5.1 Introducción

Para demostrar el impacto de los eventos de fallas sobre los costos totales de un sistema de producción a lo largo de su ciclo de vida se propone comparar el cálculo del costo de ciclo de vida del compresor Holding A utilizando dos hipótesis del modelo matemático propuesto en este estudio con el cálculo tradicional de costo de ciclo de vida. El detalle de cada caso se describe a continuación:

- Análisis de Costo de ciclo de Vida utilizando un modelo de tasa de fallas por Distribución de Weibull: Los costos se estiman con frecuencias de fallas constante calculada a partir de la distribución probabilística de Weibull. Este proceso se realiza a partir del historial de fallos del equipo y la función *frecuencia de fallas* λ está definida por el tiempo promedio entre fallas (*mean time between failures, MTBF*). Los datos necesarios para este cálculo serán proporcionados por GNL Quintero.
- Análisis de Costo de ciclo de Vida incorporando aspectos de Salud de Activos (Caso Teórico): Los costos se estiman a partir de una tasa de fallas variable basada en la relación de la cantidad de deterioro del equipo y condición inicial, el cual es cuantificado por su índice de salud HI. En este caso el criterio de overhaul y la calidad de este serán basados en la operación de GNL Quintero.
- Análisis de Costo de ciclo de Vida incorporando aspectos de Salud de Activos (Caso Overhaul Económico): Los costos se estiman a partir de una tasa de fallas variable basada en la relación de la cantidad de deterioro del equipo y condición inicial, el cual es cuantificado por su índice de salud HI. En este caso el criterio de overhaul será basado en la operación de GNL Quintero, sin embargo, se asume que el procedimiento de overhaul no retornará el equipo a su condición como nuevo.

5.2 Comparación de los resultados obtenidos

La **Tabla 5-1** muestra la cantidad de fallas de cada año en el periodo de evaluación para cada metodología de cálculo, como fue mencionado anteriormente el resultado del método tradicional es una tasa de fallas constante en el tiempo, calculada según sus parámetros de Weibull correspondientes y el promedio de horas que el equipo trabaja cada año. Los otros dos métodos muestran un comportamiento cíclico de dos años de la tasa de fallas, intervalo de tiempo que corresponde al overhaul del equipo. La hipótesis de Overhaul Económico muestra una tasa de fallas mayor en el tiempo dado que en este caso el modelo simula mayores niveles de deterioro del equipo en el tiempo.

Cantidad de fallas anuales, Compresor Holding A					
Año	Weibull	Caso Teórico	O. Económico		
2016	1	1	2		
2017	1	4	7		
2018	1	1	2		
2019	1	4	7		
2020	1	1	2		
2021	1	4	7		
2022	1	1	2		
2023	1	4	7		
2024	1	1	2		
2025	1	4	7		
Total	10	25	45		
Cantidad de overhauls	5	5	5		

Tabla 5-1: Cantidad de fallas anuales según, Weibull, Caso Teórico y O. Económico.

La **Tabla 5-2** muestra la cantidad de dinero necesaria cada año para solventar los problemas de Confiabilidad corregida por el IPC (Índice de Precios al Consumidor) y el total para cada caso.

En este caso al aislar los costos asociados a los eventos de fallas se puede apreciar el impacto del factor Confiabilidad en el aspecto económico del ciclo de vida de un activo. Dado que el modelo matemático propuesto tiene como objetivo simular la tendencia de la tasa de fallas considerando el efecto del deterioro, el procedimiento de overhaul, carga y tiempo de operación, como también la existencia de los periodos de infancia y envejecimiento del equipo (aspectos que el modelo tradicional no considera), este puede ser una buena aproximación a la realidad para lograr una estimación de los costos con una visión más conservadora.

	Costos por ev	entos de fallas, Compre	sor Holding A
Año	Weibull	Caso Teórico	O. Económico
2016	\$2.000	\$2.000	\$4.000
2017	\$2.060	\$8.240	\$14.420
2018	\$2.122	\$2.122	\$4.244
2019	\$2.185	\$8.742	\$15.298
2020	\$2.251	\$2.251	\$4.502
2021	\$2.319	\$9.274	\$16.230
2022	\$2.388	\$2.388	\$4.776
2023	\$2.460	\$9.839	\$17.218
2024	\$2.534	\$2.534	\$5.067
2025	\$2.610	\$10.438	\$18.267
Total	\$22.928	\$57.828	\$104.022

Tabla 5-2: Costos por fallas según, Weibull, Caso Teórico y O. Económico.

La **Figura 5-3** muestra gráficamente la diferencia de los costos por Confiabilidad de cada año producida por el cambio en la tasa de fallas del equipo, en este caso se confirma la hipótesis planteada anteriormente: Al aislar los costos totales por fallas es posible apreciar el efecto causado por el deterioro, entre otros factores, en la tasa de fallas del equipo y en consecuencia, la diferencia en la cantidad de dinero necesaria para solventar los problemas de Confiabilidad, a pesar de que en este caso particular, el costo de ciclo de vida no se ve afectado de gran manera.

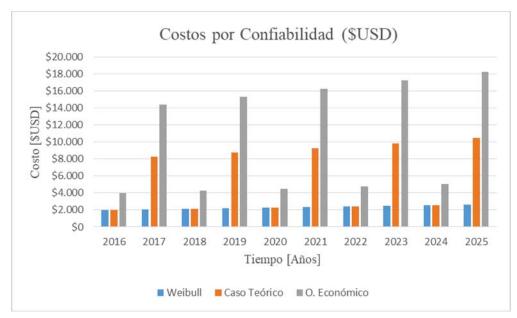


Figura 5-1: Costos por Confiabilidad, Caso Terórico, Weibull y O. Económico. Fuente: Autor.

6 CONCLUSIONES

En este estudio se cumplieron los objetivos planteados a través de la adaptación de la metodología de Índice de Salud de Activos al activo de estudio, para ser utilizada como base para cuantificar el deterioro de un activo complejo y poder relacionar su estado (entre otros factores importantes) con la tasa de fallas, por medio del modelo matemático propuesto. Gracias a lo anterior se cumple el objetivo de diseñar un Análisis de Costo de Ciclo de Vida incorporando aspectos de Salud de Activos, con el cual se logra cuantificar el impacto económico del factor Confiabilidad en la vida de un activo. Con esta herramienta se concreta el objetivo de comparar y analizar los resultados obtenidos mediante la simulación de distintos escenarios posibles.

Según los resultados obtenidos, queda demostrado que el modelo propuesto en este estudio permite hacer una buena aproximación de la tendencia de la tasa de fallas en base al Índice de Salud de un activo, en otras palabras, a la cantidad de deterioro del activo.

En el caso estudiado se demuestra que desde un punto de vista económico la ocurrencia de los eventos de fallas no tienen el mismo protagonismo en el resultado final que la cantidad y calidad de los overhauls que se le ejecutan al equipo, ya que en este ejemplo el costo de overhaul está muy por sobre del costo de la falla. Sin embargo, en el caso real la ocurrencia de los eventos de fallas si tienen un impacto importante en el funcionamiento de la planta y es un aspecto que la Jefatura de Mantenimiento de la empresa deberá considerar en conjunto con los resultados del cálculo para tomar la mejor estrategia de mantenimiento.

Al comparar la metodología propuesta con un método tradicional de cálculo de costo de ciclo de vida se evidencia que el método tradicional puede servir como aproximación en una fase primaria del cálculo. Esta supone que la tasa de fallas calculada se mantendrá constante en el tiempo, por lo tanto, pasa por alto aspectos importantes que afectarán el tendencia real de la tasa de fallas y la ocurrencia de fenómenos que influyan en ella (operaciones, mantenimiento preventivo y correctivo, calidad de los mantenimientos, etc). Como consecuencia de lo anterior, el impacto de los costos anuales por fallas se mantiene constante a lo largo de la vida útil esperada del activo, lo cual se considera como una limitación en el modelo tradicional.

Es importante tener en cuenta que el modelo tiene la posibilidad de seguir madurando en el tiempo con el conocimiento experto y accesibilidad a la información, de tal forma que se puedan ajustar parámetros que podrían cambiar en el tiempo, incorporar modificadores y/o evaluar los existentes, como también podría incentivar a la inversión en tecnologías que permitan mejorar el proceso de desarrollo de los modificadores.

La metodología propuesta en este estudio es un paso en el avance de técnicas de la Ingeniería de Confiabilidad y en la búsqueda de disminuir la incertidumbre, desconocimiento y falta de análisis que genera un alto costo a las empresas en forma de fallas imprevistas durante su operación. La metodología puede ser aplicada durante la operación de la empresa como también en fases de diseño con el objetivo de obtener la máxima rentabilidad posible en sus procesos de producción.

Finalmente, el análisis de los resultados obtenidos en los cálculos económicos del Análisis de Costo de Ciclo de Vida de un activo en conjunto con el resultado de cada escenario simulado por el modelo matemático propuesto representan una herramienta en la cual el equipo técnico de la empresa puede basarse para establecer una tendencia y tomar una decisión final, teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada activo, esto es, el impacto de cada evento de falla, complejidad técnica y logística del overhaul, criticidad y mantenibilidad del equipo, entre otras.

GLOSARIO

ACCV: Análisis de Costos de Ciclo de Vida.

CAPEX: Costos de capital.

OPEX: Costos operacionales.

TTF: time to failure, tiempo hasta la falla.

f(x): Función densidad de probabilidad de la falla.

F(x): Función de distribución acumulada de probabilidad de la falla.

C(x): Función de distribución acumulada inversa de probabilidad de que no ocurra la falla.

 $\lambda(x)$: Función frecuencia de fallas.

E(x) = MTBF: La media (esperanza matemática) o *mean time between failures*, tiempo promedio hasta la falla.

 β : Parámetro de forma.

 η : Parámetro de escala o vida característica.

bathcurve: Curva de la bañera.

Γ: Función Gamma.

CI: Costo inicial de adquisición e instalación.

CO: Costos operacionales en valor anualizado.

CMP: Costos de mantenimiento preventivo en valor anualizado.

CTPF: Costos totales por fallas en valor anualizado.

CMM: Costos de mantenimiento mayor en valor futuro.

VR: Valor residual del activo al alcanzar el final de la vida útil en valor futuro.

i: Tasa de interés.

 δ : Función frecuencia de fallas.

AHI: Asset Health Index. Índice de Salud de Activo.

Overhaul: Mantenimiento mayor.

 F_E : Factor de emplazamiento.

 F_{DC} : Factor de distancia a la costa.

 F_{SEI} : Factor de situación exterior o interior.

 F_{T} : Factor de temperatura.

 $F_{A:}$ Factor de altura con respecto al nivel del mar.

 F_{PS} : Factor de polvo en suspensión.

 F_{AT} : Factor de atmósfera corrosiva.

 F_C : Factor de carga.

 Φ : Tasa de envejecimiento del activo.

t: Variable aleatoria tiempo.

 HI_{nuevo} : 0.5 = valor de la salud correspondiente a un activo nuevo.

 $HI_{vida\ estimada}$: 5.5 = Valor de la salud correspondiente a un equipo que ha alcanzado su tiempo de vida estimada, según el fabricante.

HI_i: Índice de Salud Actual Inicial.

HI: Índice de Salud de Actual.

 M_S : Modificador de Salud.

 M_F : Modificador de Confiabilidad.

 M_C : Modificador de Carga.

 λ_i : Es el valor de la *tasa de fallas* λ para la edad i.

 k_i : Factor de corrección de la Salud para la edad i.

 t_i : Es la cantidad de horas trabajadas por el equipo en la edad i.

 CPF_k : Valor probable de dinero que se va a necesitar para solventar los problemas de confiabilidad por los eventos de fallas en el año k.

 $(Fallas\ anuales)_k$: Cantidad de fallas del año k.

 C_f : Es la cantidad de dinero asociado a solventar un evento de falla.

GNL: Gas natural licuado.

LNG: Liquefied natural gas, gas natural licuado.

BOG: Boil off gas, vapor de GNL.

VAN: Valor actual neto.

IPC: Índice de precios al consumidor.

UNE – EN 13306: 2018: Mantenimiento. Terminología del mantenimiento, Asociación
 Española de Normalización y Certificación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Arata Andreani, A., & Arata Bozzolo, A. (2013). Ingeniería de la confiabilidad: Teoría y aplicación en proyectos de capital y en la operación de instalaciones industriales a través del enfoque R-MES. Santiago de Chile.
- Crespo, A. (2019). A Model For Lifecycle Cost Calculation Based On Asset Health Index.

 Madrid.
- Crespo, A. (2019). MGM-Gas. Adaptación de un modelo de gestión del mantenimiento a la industria del gas natural. Madrid: Ingeman.
- Crespo, A., & Parra, C. (2017). Analisis de Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad.

 Definicion de intervalos de Mantenimiento Preventivo (Método Costo-Riesgo-Beneficio). Ingeman.
- Parra, C. (2005). Modelo de evaluación del impacto del factor "Fiabilidad" en el Coste Total de Ciclo de Vida de un sistema de Producción. Sevilla.
- Parra, C. (2018). Técnicas de análisis de costo de ciclo de vida e Ingeniería de Confiabilidad aplicadas en el proceso de optimización del Mantenimiento. Ingeman.
- Burckhardt Compression. (2009). Compressor Intruction Manual (Spanish).
- DNO Common Network Asset Indices Methodology. (2017).
- GNL Quintero. (2013). Manual de Puesta en Marcha, Operación y Mantenimiento.
- ISO 14224. (2013). Industria de Petróleo y Gas Recolección e Intercambio de datos de Confiabilidad y Mantenimiento de Equipos.
- ISO 55000. (2014). Gestión de Activos Aspectos generales, principios y terminología.
- UNE-EN 60300-3-3. (2009). Gestión de la confiabilidad Parte 3-3: Guía de aplicación: Cálculo de Coste de Ciclo de Vida. Madrid: AENOR.

8 ANEXOS

8.1 Flujo de Caja: Compresor Holding A, Modelo Tradicional

					Ec	quipo	3	300-K-102A	١	Inversión	14,5MUSD
8.1 Flujo de Caja: Compre	ocor L	Joldina	Λ Mad	olo do	Desc	ripción		Holding		со	\$224.935
		_			Ubi	icación	G	NL Quinte	ro	СМР	\$5.180
Tasa de fallas según o	listrik	oucion c	ie Weib	ull	Vida norn	nal estimada		9000 horas	;	СММ	\$20.000
					Criterio d	de Overhaul	^	9000 horas	Costo Falla	\$2.000	
	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		2.000	2.060	2.122	2.185	2.251	2.319	2.388	2.460	2.534	2.610
CMM			20.600		21.855		23.185		24.597		26.095
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		232.115	259.678	246.251	275.493	261.247	292.270	277.157	310.070	294.036	328.953
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		232.115	259.678	246.251	275.493	261.247	292.270	277.157	310.070	294.036	328.953
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		232.116	259.679	246.252	275.494	261.248	292.271	277.158	310.071	294.037	328.954
Inversion Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	C
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C
Flujo de Caja	0	232.116	259.679	246.252	275.494	261.248	292.271	277.158	310.071	294.037	328.954
_								VA	N	USD 1.3	44.321

8.2 Flujo de Caja: Compresor Holding A. Caso Teórico

					Ec	quipo	3	300-K-101A	1	Inversión	14,5MUSD
8.2 Flujo de Caja: Com	nrac	or Hold	ing A C	250	Desc	ripción		Holding A		со	\$224.935
	-	oi iioiu	ilig A. C	asu	Ubi	cación	GI	NL Quinte	o	CMP	\$5.180
le	órico				Vida norr	nal estimada		9000 horas		CMM	\$20.000
					Criterio	de Overhaul	Ç	9500 horas	Costo Falla	\$2.000	
Tasa de fallas anual	λ*k	1,00	4,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1,00	4,00
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		2.000	8.240	2.122	8.742	2.251	9.274	2.388	9.839	2.534	10.438
CMM			20.600		21.855		23.185		24.597		26.095
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		232.115	265.858	246.251	282.049	261.247	299.226	277.157	317.449	294.036	336.782
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		232.115	265.858	246.251	282.049	261.247	299.226	277.157	317.449	294.036	336.782
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		232.116	265.859	246.252	282.050	261.248	299.227	277.158	317.450	294.037	336.783
Inversion Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversión											
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	0	232.116	265.859	246.252	282.050	261.248	299.227	277.158	317.450	294.037	336.783
								VA	N	USD 1.3	60.097

8.3 Flujo de Caja: Compresor Holding A. Overhaul Económico

					Ec	quipo	3	00-K-101A		Inversión	14,5MUSD
8.3 Flujo de Caja: Com	nresor Ho	lding A	Overh	aul	Des	cripción		Holding		со	\$224.935
	onómico	num _b A	. • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	uui	Ub	icación	GN	NL Quinter	0	CMP	\$5.180
EC	onomico				Vida norr	nal estimada	g	9000 horas		CMM	\$10.000
					Criterio de Overhaul		~	9000 horas	5	Costo Falla	\$2.000
Tasa de falla sanual	λ	2,00	7,00	2,00	7,00	2,00	7,00	2,00	7,00	2,00	7,00
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		4.000	14.420	4.244	15.298	4.502	16.230	4.776	17.218	5.067	18.267
CMM			10.300		10.927		11.593		12.299		13.048
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		234.115	261.738	248.373	277.678	263.498	294.589	279.546	312.529	296.570	331.562
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
UDI		234.115	261.738	248.373	277.678	263.498	294.589	279.546	312.529	296.570	331.562
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		234.116	261.739	248.374	277.679	263.499	294.590	279.547	312.530	296.571	331.563
Inversion Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
IVA Inversion											
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(
Flujo de Caja	0	234.116	261.739	248.374	277.679	263.499	294.590	279.547	312.530	296.571	331.563
		VA	AN.	USD 1.3	55.451						

8.4 Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI = 5,5

					E	quipo	3	00-K-101	4	Inversión	14,5MUSD
8.4 Flujo de Caja: Co	mpr	esor F	loldin	g Δ.	Des	cripción		Holding		СО	\$224.935
, ,	-			6 ,	Ub	icación	GN	NL Quinte	ro	CMP	\$5.180
HI =	5,5				Vida nor	mal estimada	g	9000 hora:	S	CMM	\$20.000
					Criterio de Overhaul		HI = 5,5			Costo Falla	\$2.000
Tasa de fallas	λ	1,00	3,00	1,00	3,00	2,00	2,00	3,00	1,00	3,00	1,00
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		2.000	6.180	2.122	6.556	4.502	4.637	7.164	2.460	7.601	2.610
CMM			20.600		21.855		23.185	23.881		25.335	
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		232.115	263.798	246.251	279.864	263.498	294.589	305.815	285.472	324.439	302.857
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		232.115	263.798	246.251	279.864	263.498	294.589	305.815	285.472	324.439	302.857
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		232.116	263.799	246.252	279.865	263.499	294.590	305.816	285.473	324.440	302.858
Inversion Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversión											
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	0	232.116	263.799	246.252	279.865	263.499	294.590	305.816	285.473	324.440	302.858
										USD 1.3	56.981

8.5 Flujo de Caja: Compresor Holding A. HI = 4,0

					Ec	uipo	3	00-K-101	4	Inversión	14,5MUSD
8.5 Flujo de Caja: Co	mpr	esor H	loldin	g Δ.	Desc	ripción		Holding		со	\$224.935
	-		.0.0	6 /	Ubi	cación	GN	NL Quinte	ro	CMP	\$5.180
HI =	4,0				Vida norn	nal estimada	Ç	9000 hora:	S	CMM	\$20.000
					Criterio	de Overhaul		HI = 4,0		Costo Falla	\$2.000
Tasa de fallas anual	λ	1,00	2,00	2,00	1,00	3,00	2,00	1,00	2,00	3,00	2,00
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		2.000	3.883	3.770	1.830	5.331	3.450	1.675	3.252	4.736	3.066
CMM			20.600	21.218		22.510	23.185		24.597	25.335	26.095
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		232.115	261.502	269.117	253.283	286.838	293.402	276.444	310.862	321.575	329.409
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		232.115	261.502	269.117	253.283	286.838	293.402	276.444	310.862	321.575	329.409
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		232.116	261.503	269.118	253.284	286.839	293.403	276.445	310.863	321.576	329.410
Inversión Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversión											
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	C
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	0	232.116	261.503	269.118	253.284	286.839	293.403	276.445	310.863	321.576	329.410
	VA	N.	USD 1.3	69.180							

8.6 Flujo de Caja: Compresor Holding A. Overhaul Económico y HI = 5,5

					Ec	quipo	30	00-K-101A		Inversión	14,5MUSD
8.6 Flujo de Caja: Co	mp	resor	Holdin	ıg Α.	Desc	cripción		Holding		со	\$224.935
	-			. 6 /	Ubi	cación	GN	IL Quinter)	CMP	\$5.180
Overhaul Econd	ómic	co y HI	= 5,5		Vida norn	nal estimada	9	000 horas		СММ	\$10.000
					Criterio	de Overhaul		HI = 5,5	Costo Falla	\$2.000	
Tasa de fallas anual	λ	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		4.000	6.180	4.244	4.371	4.502	2.319	4.776	4.919	5.067	5.219
CMM			10.300	10.609	10.927	11.255	11.593		12.299	12.668	13.048
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		234.115	253.498	258.982	266.751	274.754	280.678	279.546	300.231	309.238	318.515
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		234.115	253.498	258.982	266.751	274.754	280.678	279.546	300.231	309.238	318.515
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		234.116	253.499	258.983	266.752	274.755	280.679	279.547	300.232	309.239	318.516
Inversión Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversión											
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	0	234.116	253.499	258.983	266.752	274.755	280.679	279.547	300.232	309.239	318.516
								VA	N	USD 1.3	45.885

8.7 Flujo de Caja: Compresor Holding A. Overhaul Económico y HI = 4,0

					Ed	quipo	30	0-K-101A		Inversión	14,5MUSD
8.7 Flujo de Caja: Co	mpre	sor Ho	lding A	Δ.	Des	cripción		Holding		со	\$224.935
•	•		•		Ub	icación	GN	L Quintero)	CMP	\$5.180
Overhaul Econó	mico	y HI =	4,0		Vida norr	nal estimada	90	000 horas		CMM	\$10.000
					Criterio	de Overhaul		HI = 4,0	Costo Falla	\$2.000	
Tasa de fallas anual	λ	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ingresos por ventas		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias/Pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos operacionales		224.935	231.683	238.634	245.793	253.166	260.761	268.584	276.642	284.941	293.489
CMP		5.180	5.335	5.495	5.660	5.830	6.005	6.185	6.371	6.562	6.759
Costo por falla		4.000	4.120	4.244	4.371	4.502	4.637	4.776	4.919	5.067	5.219
CMM			10.300	10.609	10.927	11.255	11.593	11.941	12.299	12.668	13.048
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		234.115	251.438	258.982	266.751	274.754	282.996	291.486	300.231	309.238	318.515
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		234.115	251.438	258.982	266.751	274.754	282.996	291.486	300.231	309.238	318.515
Ganancia de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Operacional		234.116	251.439	258.983	266.752	274.755	282.997	291.487	300.232	309.239	318.516
Inversión Fija	0										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversión											
Amortización		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	0	234.116	251.439	258.983	266.752	274.755	282.997	291.487	300.232	309.239	318.516
									N	USD 1.3	49.818

8.8 Mapa Conceptual: Metodología de Cálculo de Índice de Salud

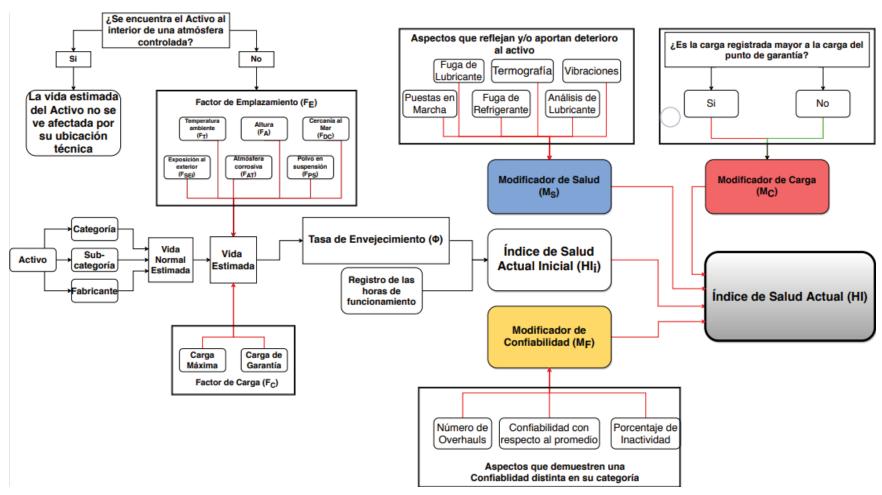


Figura 8-1: Mapa conceptual: Índice de Salud. Fuente: Autor.