ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

"DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE COSTO DE CICLO DE VIDA INCORPORANDO ASPECTOS DE SALUD DE ACTIVOS PARA UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA DE MAR"

Tamara S. Hidalgo Cardoza

Ingeniera Civil Mecánica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Profesor Guía: Sr. Orlando Durán Acevedo

Profesor Co-Guía: Sr. Fabián Orellana Zamorano

2020

Resumen Ejecutivo

Se diseña un modelo de análisis de los Costos de Ciclo de Vida que incorpora el concepto de salud de activos. Este modelo fue validado en un caso real de una Bomba de Agua de mar del terminal GNL Quintero. En principio, se estudian los factores ambientales y de ubicación, se determinan los modificadores de salud y confiabilidad que afectan a la bomba y se asignan las referencias a cada uno para aplicar la metodología al periodo de tiempo de estudio, finalmente se propone una relación entre el Índice de Salud Inicial y el Índice de Salud Modificado, la cual se incorpora a la tasa de fallas de la Distribución de Weibull, uniéndola al Análisis del Costo de Ciclo de Vida de la Bomba de Agua a través de un flujo de caja. El método propuesto se compara con el método tradicional de este tipo de análisis. Como resultado, la incorporación de la salud de los activos en el análisis genera un aumento en los costos por falla.

Abstract

A Life Cycle Cost Analysis Model is designed that incorporates the concept of asset health. This model was validated in a real case of a Sea Water Pump from GNL Quintero terminal. In the first place, it was studied the environmental and the location factors, it was determined the health and reliability modifiers affecting the pump, and references are assigned to each to apply the methodology to the study period, and finally, it was proposed a relationship between the Initial Health Index and Modified Health Index, which is incorporated into the failure rate of the Weibull Distribution, joining it to the Analysis of the Life Cycle Cost of the Water Pump through a cash flow. The proposed method is compared with the traditional method of this type of analysis. As a result, an increase in failure costs is observed because the health status of the equipment is represented in the number of failures. As a result, incorporating the health of assets in the analysis generates an increase in the failure costs.

Índice

Resumen Ejecutivo II

Abstract II

Índice de Figuras V

Índice de Tablas VII

1. Introducción ..... - 1 -

1.1. Objetivos ..... - 3 -

1.1.1. Objetivo general ..... - 3 -

1.1.2. Objetivos específicos ..... - 3 -

1.2. Problema ..... - 4 -

1.3. Contexto ..... - 5 -

2. Marco Teórico ..... - 6 -

2.1. Salud de Activos ..... - 6 -

2.2. Indicadores básicos del análisis estadístico de confiabilidad ..... - 18 -

2.2.1. Distribución de Weibull ..... - 19 -

2.2.2. Indicadores de confiabilidad de la distribución de Weibull ..... - 20 -

2.3. Análisis de Costos de ciclo de vida ..... - 21 -

2.4. Modelo de tasa de fallos según MTTF de la Distribución de Weibull ..... - 25 -

3. Desarrollo del modelo ..... - 27 -

3.1. Paso 1: Cálculo del Factor de corrección *K* ..... - 27 -

3.2. Paso 2: Cálculo de λ corregido ..... - 27 -

3.3. Paso 3: Cálculo de fallas anuales ..... - 29 -

3.4. Paso 4: Cálculo de costos totales por fallas ..... - 29 -

3.5. Paso 5: Corrección de la ecuación de ACCV ..... - 30 -

3.6. Paso 6: Análisis de Costo de Ciclo de Vida ..... - 30 -

4. Estudio de caso: Bomba de agua de mar ..... - 33 -

4.1. Análisis de Salud de Activos ..... - 34 -

4.2. Cálculo del Factor *K* ..... - 48 -

4.3. Tasa de fallas según Distribución de Weibull ..... - 50 -

4.4. Análisis de Costo de Ciclo de Vida ..... - 60 -

5. Validación y comparación con modelo tradicional de LCC ..... - 63 -

6. Conclusiones ..... - 67 -

7. Glosario ..... - 69 -

8. Bibliografía ..... - 72 -

9. Anexos ..... - 73 -

9.1. Tablas de Costos Totales ..... - 73 -

9.2. Diagrama del procedimiento de la metodología propuesta ..... - 77 -

Índice de Figuras

Figura 2-1: Gráfico HI vs Tiempo. Fuente: Autor ..... - 7 -
Figura 2-2: Gráfico del Índice de Salud Inicial vs Tiempo. Fuente: Autor ..... - 12 -
Figura 2-3: Diagrama de Influencias. Índice de Salud. Fuente: Autor ..... - 16 -
Figura 2-4: Gráfico del Índice de Salud Inicial y Modificado vs Tiempo. Fuente: Autor ... - 17 -
Figura 2-5: Representación gráfica de la tasa de fallas, curva conocida como "curva de la bañera". Fuente: (Salazar, 2004) ..... - 20 -
Figura 2-6: Distribución de los Costos (CAPEX y OPEX) a lo largo del tiempo. Fuente: (Parra, 2018) ..... - 22 -
Figura 3-1: Gráfico de Lambda (tasa de fallas) y Lambda*K vs Tiempo. Fuente: Autor .... - 28 -
Figura 4-1: Sistema de Bombeo GNL Quintero ..... - 34 -
Figura 4-2: Sistema de Bombeo GNL Quintero, ampliación. De izquierda a derecha, Bomba A, B C y D. ..... - 34 -
Figura 4-3: Índice de Salud Inicial de la Bomba A. Fuente: Autor ..... - 36 -
Figura 4-4: Diagrama de Influencias para el Índice de Salud. Fuente: Autor ..... - 41 -
Figura 4-5:Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 1. Fuente: Autor ..... - 43 -
Figura 4-6: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 2. Fuente: Autor ..... - 44 -
Figura 4-7: Gráfico del Índice de Salud de Activo vs Tiempo de la Bomba para el Caso 3. Fuente: Autor ..... - 45 -
Figura 4-8: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 4. Fuente: Autor ..... - 46 -
Figura 4-9: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 5. Fuente: Autor ..... - 47 -
Figura 4-10: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 6. Fuente: Autor ..... - 48 -
Figura 4-11: Gráfico de la tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 1. Fuente: Autor ..... - 51 -

Figura 4-12: Gráfico de la Tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 2. Fuente: Autor ..... - 52 -
Figura 4-13: Gráfico de la Tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 3. Fuente: Autor ..... - 54 -
Figura 4-14: Gráfico de la Tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 4. Fuente: Autor ..... - 55 -
Figura 4-15: Gráfico de la Tasa de Fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 5. Fuente: Autor ..... - 57 -
Figura 4-16: Gráfico de la Tasa de Fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 6. Fuente: Autor ..... - 58 -
Figura 5-1: Gráfico de la cantidad de fallas al año antes y después de la aplicación del factor de corrección K y según el método tradicional. Ccaso 1. Fuente: Autor ..... - 64 -
Figura 5-2: Gráfico de la cantidad de falla al año antes y después de la aplicación del factor de corrección K y según el método tradicional. Caso 2. Fuente: Autor ..... - 65 -
Figura 9-1: Diagrama del procedimiento del Cálculo del Análisis del Costo del Ciclo de Vida incorporando la Salud de Activos. ..... - 77 -

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Factores de emplazamiento y sus referencias. Fuente: Autor ..... - 9 -
Tabla 4-1: Datos Operativos de la Bomba. Fuente: Autor ..... - 34 -
Tabla 4-2: Valores de factor de emplazamiento. Fuente: Autor ..... - 35 -
Tabla 4-3: Modificadores de Salud y sus referencias. Fuente: Autor ..... - 38 -
Tabla 4-4: Modificadores de Confiabilidad y sus referencias. Fuente: Autor ..... - 39 -
Tabla 4-5: Valores del Índice de Salud inicial y modificado, factor K y tasas de falla: Lambda y Lambda*K para el periodo de 24 meses, años 2016 y 2017 ..... - 49 -
Tabla 4-6: Datos de Weibull. Fuente: GNL Quintero. Diseño: Autor ..... - 50 -
Tabla 4-7: Fallas totales antes y después de la aplicación del factor de corrección en cada año con su respectivo porcentaje de aumento. Caso 1. Fuente: Autor ..... - 51 -
Tabla 4-8: Fallas totales antes y después de la aplicación del factor de corrección en cada año con su respectivo porcentaje de aumento. Caso 2. Fuente: Autor ..... - 53 -
Tabla 4-9: Resumen de las fallas totales al año antes y después de la aplicación del factor de corrección en cada año con su respectivo porcentaje de aumento. Casos 3 y 4. Fuente: Autor .. - 56 -
Tabla 4-10: Resumen de las fallas totales al año antes y después de la aplicación del factor de corrección con su respectivo porcentaje de aumento. Casos 5 y 6. Fuente: Autor ..... - 59 -
Tabla 4-11: Resumen de costos. Fuente: Autor ..... - 60 -
Tabla 4-12: IPC y Tasa de descuento. Fuente: Autor ..... - 60 -
Tabla 4-13: Resumen de los costos totales por falla en valor presente por cada caso de estudio. Fuente: Autor ..... - 61 -
Tabla 4-14: Resumen de la Cantidad de fallas totales, Cantidad de Overhauls y Valor Actual Neto durante el periodo de trabajo para cada caso de estudio. Fuente: Autor ..... - 61 -
Tabla 5-1: Resumen de la Cantidad de Overhauls, Cantidad de fallas totales y el Costo Total en valor presente para el método tradicional y el método propuesto para los Casos 1 y 2. Fuente: Autor. ..... - 63 -
Tabla 5-2: Resumen de la cantidad de fallas y los costos totales por fallas en valor presente para el método antes y después de la aplicación del factor K y método tradicional. Casos 1 y 2. Fuente: Autor. ..... - 66 -
Tabla 9-1: ACCV con Método propuesto. Caso 1. Fuente: Autor ..... - 73 -

Tabla 9-2: ACCV con Método tradicional. Caso 1. Fuente: Autor .....- 73 -
Tabla 9-3: ACCV con Método tradicional. Caso 2. Fuente: Autor .....- 74 -
Tabla 9-4: ACCV con Método propuesto. Caso 2. Fuente: Autor .....- 74 -
Tabla 9-5: ACCV con Método propuesto. Caso 3. Fuente: Autor .....- 75 -
Tabla 9-6: ACCV con Método propuesto. Caso 4. Fuente: Autor .....- 75 -
Tabla 9-7: ACCV con Método propuesto. Caso 5. Fuente: Autor .....- 76 -
Tabla 9-8: ACCV con Método propuesto. Caso 6. Fuente: Autor .....- 76 -

1. Introducción

El análisis del costo de ciclo de vida es un estudio que permite analizar los distintos costos involucrados en el activo durante toda la vida útil del mismo, estos son desde su concepción hasta su eliminación. La ventaja de un análisis de costo de ciclo de vida es principalmente que permite entregar información de la vida del activo otorgando las herramientas necesarias para una futura toma de decisiones. En la ingeniería, a lo largo de los años, se han empleado diversas técnicas de análisis del costo de ciclo de vida de los activos y a través del tiempo se han diseñado una serie de actividades que permiten darle mayor especificidad al estudio. Es decir, se incorporan actividades al análisis con el fin de cubrir con las diversas limitaciones que se van presentando en la particularidad.

Por otra parte, la salud de activos es una característica que permite cuantificar el deterioro de un equipo, incorporando factores semicuantitativos que le agreguen dicha situación a los modelos de gestión de activos. Este análisis se realiza con la información de las actividades de operación, mantenimiento e historial de fallas, con el objetivo de determinar el estado o condición en la que se encuentra el activo de estudio. Estas materias han tomado serio protagonismo en la industria permitiendo realizar estudios de los equipos para, en algunos casos, prever las fallas o la pronta detección en caso de necesitar mantenimiento mayor o reemplazo.

Actualmente se está trabajando en incorporar las temáticas de la confiabilidad en el análisis del costo de ciclo de vida, permitiendo entregar información certera del costo por fallas y útil para la futura toma de decisiones. Estudios previos han utilizado la Distribución de Weibull para determinar los eventos de falla bajo una función probabilística, sin embargo, una de las grandes limitaciones que presentan estos estudios es al momento de considerar la cantidad real o más aproximada de fallas como constante para cada año de trabajo del equipo.

Para cubrir esta limitación es que el presente trabajo busca incorporar aspectos del estudio de la salud de los activos en el análisis de los costos del ciclo de vida y su validación a través de la aplicación en un caso real de una bomba de agua de mar de la empresa GNL Quintero. El

objetivo principal es incorporar la cuantificación del deterioro de los activos en el análisis de los costos del ciclo de vida.

El diseño del modelo comienza con el cálculo del índice de salud y para esto se estudian los factores de locación, diversos factores que afectan la salud de la bomba, las condiciones de operación de la bomba, los modos de falla y los factores que afectan a la confiabilidad. Posteriormente se emplea una relación entre el comportamiento de la salud a nivel teórico (según fabricante o información entregada por la empresa) de la bomba con el comportamiento real, y esta relación se incorpora en la tasa de fallas de la Distribución de Weibull la cual irá variando a lo largo del tiempo, influenciada por el índice de salud del activo. Finalmente se desarrolla un flujo de caja con todos los costos asociados al ciclo de vida de la bomba. Este estudio se efectúa para 6 casos de estudio, permitiendo entregar una comparativa entre estos casos bajo el modelo propuesto y el modelo tradicional.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Diseñar un modelo matemático que integre el análisis del costo del ciclo de vida con las temáticas de salud de activos, de manera que permita cuantificar el impacto del deterioro de los activos en la frecuencia de falla y, por tanto, en la estimación de costos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar aspectos relevantes para determinar la salud de los activos con el fin de aplicarla en un sistema de bombeo de agua de mar.
- Identificar los modificadores operacionales y de confiabilidad que afectarán la salud del activo
- Aplicar la metodología de evaluación y cálculo de los índices de salud del sistema de una bomba de agua de mar
- Desarrollar el modelo matemático que permita combinar el índice de salud con la tasa de fallas y con esto al análisis de costo de ciclo de vida.
- Aplicar la metodología desarrollada al análisis de costo de ciclo de vida de la bomba de agua de mar
- Comparar con metodologías tradicionales de costo de ciclo de vida.

1.2. Problema

El cálculo de costos del ciclo de vida de un activo se define como una cuantificación de los costos que se le atribuyen a un equipo desde su concepción hasta su eliminación, y que tiene por objetivo apoyar diversos análisis relacionados a los mismos costos que lo componen, tales como, inversión inicial, costos de operación, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, mantenimiento mayor y valor residual al fin de su vida útil.

Es necesario diseñar una mejora de las metodologías utilizadas para cuantificar los costos por falla, permitiendo disminuir la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones para diversas áreas involucradas.

Comúnmente se cuantifica la confiabilidad y el efecto de las fallas en los costos totales de un activo. Eso se realiza a través de un modelo que se basa en una tasa probabilística de fallas constante durante el periodo de trabajo, utilizando las distribuciones de Weibull. Sin embargo, el problema principal de esta metodología recae en que el modelo empleado no incorpora la salud del activo propiamente tal, es decir, únicamente emplea los indicadores de análisis estadístico de confiabilidad de la distribución de Weibull, lo cual, si bien se puede acercar a la realidad, no será del todo representativa porque no considera las variaciones de las condiciones ambientales en las que se encuentra el equipo, el deterioro, condiciones del uso, etc.

Por otra parte, el modelo propuesto se basa en datos recopilados del historial de fallos y experiencia del personal de mantenimiento y operaciones, sin embargo, el modelo tradicional considera que la cantidad de fallas es constante a través de los años de estudio, ignorando los cambios que sufre el equipo en la propia frecuencia de fallos o por los cambios del equipo de estudio debido a la influencia de factores operacionales, ambientes, condiciones de mantenimiento, etc.

1.3. Contexto

Desde hace un tiempo, las metodologías de la gestión de activos enfocaron sus esfuerzos en analizar el control operativo para mantener el equipo la mayor cantidad de tiempo disponible. A continuación, notaron que al disminuir los costos y optimizar los procesos se mejoran los ciclos de vida de los equipos. (Crespo A. , 2019).

Posteriormente, se diseñaron técnicas en donde se podía incorporar la confiabilidad en el análisis del costo de ciclo de vida de los activos, específicamente en la tasa de fallas. Sin embargo, estas presentan ciertas limitaciones que dejan abierta la posibilidad a buscar nuevas alternativas que permitan cubrir estos controles.

Los activos tienen un alto valor, son muy específicos, es decir, tienen alta complejidad a nivel tecnológico y su costo proyecta un largo ciclo de vida. Por ende, los esfuerzos están en que se mantengan disponibles la mayor cantidad de tiempo. Es por lo anterior que se hace necesario encontrar una metodología que permita combinar los costos con la salud de los activos, optimizando el momento en el cual es necesario realizar el reemplazo del activo, entre otro tipo de decisiones, mejorando la toma de estas para futuros mantenimientos y entregando claridad en los costos comprometidos en la salud del activo.

2. Marco Teórico

2.1. Salud de Activos

La definición de activo es algo que tiene valor específico para una organización y este puede ser tangible o intangible. En otras palabras, para el interés que requiere este estudio, los activos son maquinarias que tendrán un valor específico para la organización.

Y cuando se habla del índice de salud de los activos significa que es un parámetro que está diseñado para reflejar o caracterizar la condición de los activos en el tiempo, es decir, representa un procedimiento para cuantificar la salud o, en su defecto, el deterioro que posee.

El Índice de Salud de Activos (AHI, por sus siglas en inglés) hará referencia a la condición o estado de este y lo próximo que se encuentra al final de su vida útil.

Cuantificar la salud del activo es lo que busca la metodología del Índice de Salud y los principales objetivos a alcanzar con la aplicación de esta metodología son:

- Cuantificar la probabilidad de falla en función de su índice de salud.
- Optimizar los planes de las áreas de Operaciones y Mantenimiento.
- Evaluar la vida útil de los activos.
- Prever la fecha adecuada de actividades de mantenimiento preventivo o grandes mantenimientos y/o sustituciones.

El índice de salud (HI), es un número adimensional entre los valores de 0.5 y 10, los cuales corresponden a la condición de equipo nuevo y a la condición del equipo al final de su vida útil, respectivamente. Sin embargo, matemáticamente es posible encontrar valores superiores a 10. Éste índice posee un comportamiento exponencial frente a la edad del activo.

Para un Índice de Salud de Activos (AHI) adecuado, es necesario tener datos de los activos, ya sea su historial de operaciones y mantenimiento, posibles modos de falla, problemas que afectarán el rendimiento de los activos, las condiciones donde se encuentran instalados, la carga con la que trabajan, y condiciones de confiabilidad que afectan directamente a la salud de este.

Metodología de cálculo del índice de salud de activos

Para cumplir con los objetivos propuestos, se estableció una metodología de cálculo, en donde es necesario recopilar datos iniciales para el cálculo del índice:

- La identificación del activo, es decir, la edad actual, las horas de vida esperada, modelo y locación.
- Datos de operación registrados, para determinar el periodo de tiempo en el cual el equipo ha estado expuesto a trabajo constante, número de arranques y paradas, consumos, etc.
- La condición del equipo en las visitas de personal de mantenimiento, resultados de lecturas de variables físicas como caudal y vibraciones, análisis de aceite, resultado de inspecciones visuales, corrosión, estado de la pintura, etc.

El Índice de salud, como se ha mencionado, corresponde a una curva de comportamiento exponencial, en la Figura 2-1 se presenta el gráfico HI vs Tiempo con los distintos rangos en los que divide el índice.

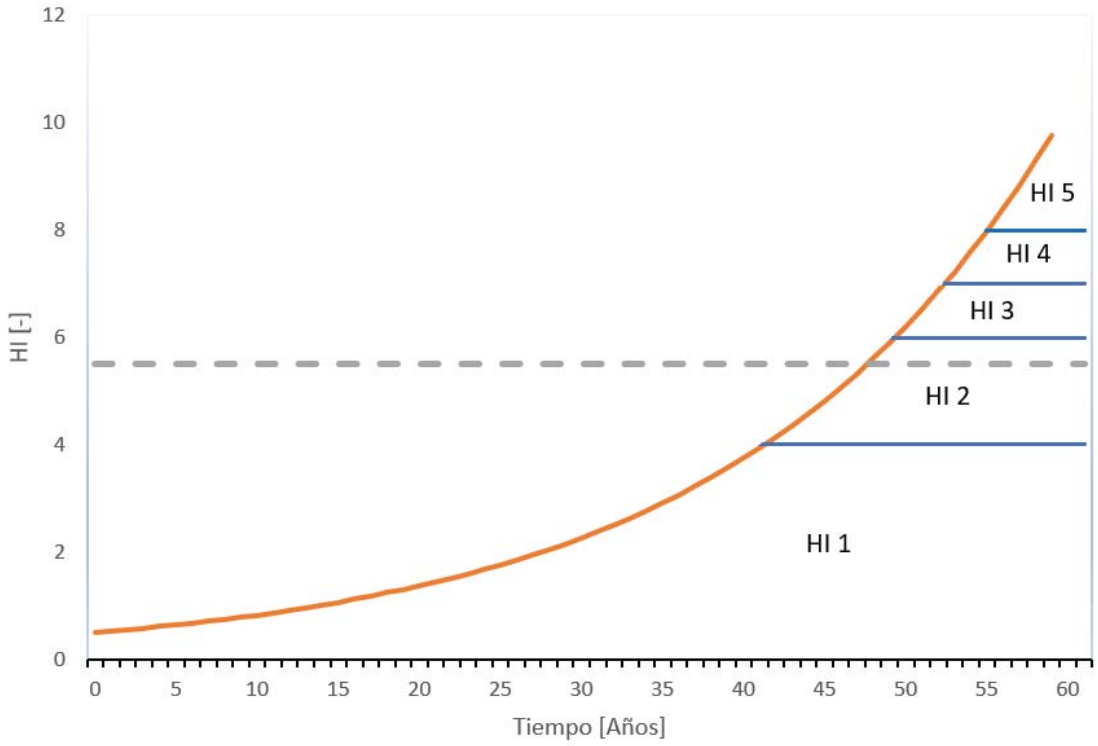

Figura 2-1: Gráfico HI vs Tiempo. Fuente: Autor

Para el rango HI 1, compuesto entre los valores HI=0,5 y HI=4, se señala que el equipo se comporta como un equipo nuevo; el rango HI 2 compuesto entre los valores HI=4 y HI=6, el equipo se comienza a desgastar. Dentro de este rango, se encuentra el valor de HI=5,5 (línea punteada), cuyo valor equivale a la vida normal esperada para el equipo. (Crespo A. , MGM Gas, 2019).

Luego de este período, se contemplan en la metodología los tres intervalos siguientes: HI 3, HI 4 y HI 5, que implican que los valores de HI alcanzan 6, 7 y 8, respectivamente. Cuando los valores de HI son mayores a 8, quiere decir que el equipo se encuentra al final de su vida útil.

A continuación, se presenta en detalle cada uno de los pasos de la metodología para calcular el índice de salud de activos (AHI)

Paso 1: Vida normal estimada

En este paso, se identifica al equipo y toda la información con respecto a su ubicación geográfica. Para calcular la vida estimada se necesita obtener los siguientes datos:

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

Al momento de definir estos conceptos, se sigue la estructura de descripción de la ISO 14224, la cual busca identificar el activo. Cuando se define la categoría del equipo, se estudia la información del equipo y en cuanto a la subcategoría del equipo, se estudian los antecedentes de operación.

Ya identificados los activos a los que se les realiza el estudio, lo que sigue es obtener la **vida normal estimada del activo**. Generalmente es información entregada por el fabricante o el departamento técnico de la compañía, tomando como dato fundamental la experiencia del activo hasta el punto del análisis.

Paso 2: Vida estimada

La vida estimada trata de especifica la vida normal esperada en función de los siguientes conceptos:

- Factor de emplazamiento
- Factor de carga

Los **factores de emplazamiento** están relacionados a la localización del equipo dentro de la compañía y a la zona geográfica en donde está ubicado. Su exposición a polvo en suspensión, distancia a la costa o en caso de que la empresa se encuentre ubicada a una determinada altitud, son factores que influenciarán en la vida estimada.

Para lo anterior se decide diseñar una tabla con los factores que más afectan a la salud en conjunto con los valores de referencia correspondientes en cada categoría a evaluar.

La Tabla 2-1 presenta los valores de referencia de cada categoría de evaluación, esta tabla cuantifica el impacto de cada uno de los factores en la definición de la vida estimada. Se debe tener en consideración que los factores pueden verse modificados a lo largo del periodo de estudio, y esto puede deberse, por ejemplo, a que las condiciones ambientales empeoren, existan mayor o menor cantidad de polvo en suspensión, etc. Y es por eso que, es necesario realizar las mediciones constantemente para mejorar o confirmar los valores asignados.

FACTORES DE EMPLAZAMIENTO						
N°	**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
N°	**Categoría**	**exterior**	**interior**			
2	Situación exterior/interior	1,2	1			
N°	**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	
N°	**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	
N°	**Categoría**	**no**	**sí**			
5	Exposición a polvo en suspensión	1	1,2			
6	Exposición a atmósfera corrosiva	1	1,2			

Tabla 2-1: Factores de emplazamiento y sus referencias. Fuente: Autor

Una vez obtenidos los valores respectivos en cada categoría se obtiene el factor de emplazamiento final, definido en la Ecuación 1:

$$F_E = \max\left(F_{DC}, F_{SEI}, F_T, F_A, F_{PS}, F_{AT}\right) \qquad (1)$$

Donde:

$F_E = Factor\ de\ emplazamiento$

$F_{DC} = Factor\ de\ distancia\ a\ la\ costa$

$F_{SEI} = Factor\ de\ situación\ exterior\ o\ interior$

$F_T = Factor\ de\ temperatura$

$F_A = Factor\ de\ altura\ con\ respecto\ al\ mar$

$F_{PS} = Factor\ de\ polvo\ en\ suspensión$

$F_{AT} = Factor\ de\ atmósfera\ corrosiva$

Cuando el equipo se encuentra al interior de un recinto con una atmósfera controlada o condiciones ideales, el factor de emplazamiento tendrá valor 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) y el punto de carga máxima posible al que podría someterse, ambos datos son entregados por el fabricante.

La ecuación que representa el factor de carga es:

$$F_C = \frac{Carga\ en\ condiciones\ normales\ o\ en\ el\ punto\ de\ garantía}{Carga\ máxima\ admisible} \qquad (2)$$

Según la ecuación 2, F_C tomará valores menores a 1, debido que las condiciones normales o en el punto de garantía son menores a la carga máxima admisible.

Finalmente, la vida estimada del activo es, por tanto, el cociente entre la vida normal estimada previamente obtenida y el producto del factor de emplazamiento y de carga.

$$Vida\ estimada = \frac{Vida\ normal\ estimada}{F_E \cdot F_C} \qquad (3)$$

Por lo tanto, la vida estimada de un activo se verá afectada directamente por la ubicación de este y su propio rendimiento.

Es importante mencionar que el producto $F_E \cdot F_C$ será determinante en el valor de la vida estimada. El valor de la Vida Estimada disminuirá cuando $(F_E \cdot F_C) > 1$ y aumentará cuando $(F_E \cdot F_C) < 1$.

Paso 3: Tasa de Envejecimiento

La tasa de envejecimiento es un parámetro del modelo, propio de cada equipo a estudiar que, a través de una relación matemática, entrega el modo de comportamiento del activo que más adelante será útil para determinar cómo afectan los distintos sucesos que sufre un activo en su salud. Matemáticamente representará la forma de la curva del índice de salud, por lo tanto, será una tasa única para cada equipo.

La fórmula que representa la tasa de envejecimiento es:

$$\Phi = \frac{\ln\left(\frac{HI_{vida\ estimada}}{HI_{nuevo}}\right)}{Vida\ estimada} \qquad (4)$$

Donde:

Φ: $Tasa\ de\ envejecimiento\ del\ activo$

$HI_{nuevo} = 0{,}5$: $valor\ de\ la\ salud\ correspondiente\ a\ un\ activo\ nuevo$

$HI_{vida\ estimada} = 5{,}5$: $valor\ de\ la\ salud\ correspondiente\ a\ un\ equipo\ que\ ha$

$alcanzado\ su\ tiempo\ de\ vida\ estimada, según\ el\ fabricante$

$Vida\ estimada$: $Horas\ calculadas\ en\ el\ paso\ 2$

Por lo tanto, la ecuación 4 queda como sigue:

$$\Phi = \frac{2{,}4}{Vida\ estimada} \qquad (5)$$

Paso 4: Cálculo del Índice de Salud Actual Inicial

El Índice de Salud Inicial representa una tendencia exponencial bajo el comportamiento teórico del equipo previo a la aplicación de los modificadores de salud, confiabilidad y carga. Su valor se encuentra entre el 0,5 y 10, número adimensional. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$HIi(t) = HI_{nuevo} \cdot e^{\Phi \cdot t} \qquad (6)$$

Donde

$HI_i(t)$: $Indice\ de\ salud\ inicial\ en\ el\ instante\ t$

$HI_{nuevo} = 0{,}5$: $valor\ de\ la\ salud\ correspondiente\ a\ un\ activo\ nuevo$

Φ: $Tasa\ de\ envejecimiento\ del\ activo$

t: $edad\ actual\ del\ activo\ (en\ unidades\ de\ tiempo)$

Por lo tanto, la ecuación 6 queda como sigue:

$$HIi(t) = 0{,}5 \cdot e^{2{,}4 \cdot t} \qquad (7)$$

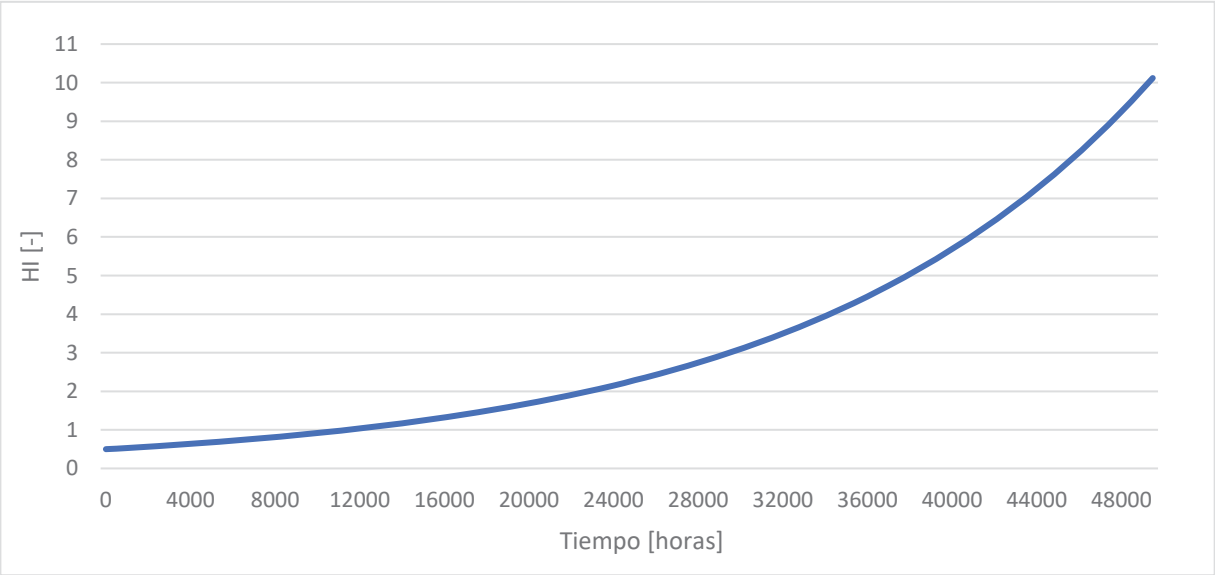

Figura 2-2: Gráfico del Índice de Salud Inicial vs Tiempo. Fuente: Autor

La Figura 2-2 presenta, a modo de ejemplo, la forma de la curva del Índice de Salud Inicial vs el tiempo. Como se menciona el valor naturalmente llega a 10, sin embargo, matemáticamente puede tener valores mayores, los cuales representarán una salud más deteriorada del activo. Por otra parte, el valor de las horas irá variando según sea el activo a estudiar, ya que depende únicamente de la vida normal estimada del equipo.

Paso 5: Cálculo del Índice de Salud Actual Modificado

El Índice de salud actual modificado (HIM), es como su nombre lo dice, el ajuste del índice de salud actual inicial, descrito en el punto anterior. Este ajuste influye directamente sobre el índice de salud inicial (HIi) con el objetivo de que exista una diferencia con el comportamiento teórico del equipo cuantificando los factores que afectan la duración de la vida útil del equipo. Estos factores son los denominados modificadores de la salud, de confiabilidad y de carga, cuya ecuación es:

$$HIM(t) = HI_{nuevo} \cdot e^{\frac{\Phi \cdot t}{M_C}} \cdot M_S \cdot M_F \qquad (8)$$

Donde:

$HIM(t)$: $Indice\ de\ salud\ actual\ modificado en\ el\ periodo\ t$

M_S: $Modificador\ de\ Salud\ del\ activo\ (condición\ y\ operación)$

M_F: $Modificador\ de\ Confiabilidad\ del\ activo$

M_C: $Modificador\ de\ Carga$

Este paso es necesario ya que las condiciones del uso del activo afectan directamente en su salud. Es decir, este índice modificado permite ajustar el deterioro actual del equipo para compararlo con el deterioro previsto según el comportamiento teórico.

Para la evaluación del **modificador de salud** se tienen en cuenta las diferentes categorías en las que es posible medir y cuantificar el activo, y se usan parámetros que definen la implicancia sobre la salud actual de este. Esto se obtiene a través del resultado de inspecciones y chequeos realizados en el activo, durante los mantenimientos programados y las actividades de operación.

Puesto que la metodología es adaptable a cualquier otro equipo es posible encontrar un activo con diferentes modificadores. Es por esto, que se debe realizar una selección de los modificadores de salud que afectan directamente al activo de estudio. De esta forma, para el equipo de estudio se seleccionan los modificadores de salud asociados a los estados de condición, operación o mantenimiento propios de este, permitiendo darle mayor grado de especificidad al análisis. Posteriormente, para cuantificar el deterioro, se utiliza una escala de referencia con sus valores respectivos. Los valores de los modificadores implicados tendrán valores comprendidos entre 1 y 1.4, para los estados en donde la salud del activo se vea más penalizada, se le asignan valores cercanos a 1.4.

Ejemplos de modificadores utilizados son: el nivel de corrosión, el nivel de deterioro, fugas de líquido o gas, resultado de termografía, la cantidad de puesta en marcha, resultado de vibraciones, resultado de fugas de aceite, estado de recubrimiento, el caudal, etc.

Se debe tener en cuenta que estos modificadores no son constantes a través del tiempo, es necesario alterarlos según la situación actual del equipo, esto permitirá entregar datos representativos en el momento de la evaluación.

La ecuación para obtener el valor del modificador de salud (M_S) es:

$$M_S(t) = \prod_{j=1}^{j=n} M_{S_j}(t) \qquad (9)$$

Donde:

$j = 1,2, \dots, n.$ *Índice utilizado para la cantidad de modificadores de salud*

$M_S(t)$: *Modificador de Salud en tiempo t*

Los **modificadores de la confiabilidad** (M_F) se aplican a activos cuya confiabilidad es distinta a la de un activo típico dentro de la misma categoría. Normalmente, se identifican por la información entregada por el fabricante o por experiencia del activo frente a pruebas de fallas. Los diferentes modificadores de confiabilidad se pueden relacionar al número de overhauls, el porcentaje de inactividad y la confiabilidad con respecto al promedio. De la

misma manera que para el modificador de salud se realiza una escala de referencia con sus valores respectivos, los que generalmente varían entre 1 y 1.2, luego se asignan los valores a cada categoría según la situación.

Se debe tener en cuenta que estos modificadores no son constantes a través del tiempo, es necesario alterarlos según la situación actual del equipo, lo que entregará información actualizada. Una vez obtenidos los valores en cada categoría se utiliza la ecuación para obtener el valor del modificador de confiabilidad (M_F), la cual es:

$$M_F(t) = \prod_{k=1}^{k=m} M_{F_k}(t) \qquad (10)$$

Donde:

$k = 1,2, \dots, m.$ $Índice\ utilizado\ para\ la\ cantidad\ de\ modificadores\ de\ confiabilidad$

$M_F(t)$: $Modificador\ de\ Confiabilidad\ en\ tiempo\ t$

Finalmente, al operar un activo fuera de su rango de carga recomendado por el fabricante también entregará una penalización en la salud del activo y en conjunto a su índice de salud. Esta penalización se cuantifica a través del **Modificador de Carga** (M_C) la cual se representa según la siguiente fórmula:

$$M_C(edad) = \frac{\dfrac{Carga\ en\ condiciones\ normales\ o\ en\ el\ punto\ de\ garantía}{Carga\ máxima\ admisible}}{\dfrac{Promedio\ de\ carga\ (edad)}{Carga\ máxima\ admisible}} \qquad (11)$$

La ecuación N° 11 entrega la relación entre la carga en condiciones normales o en el punto de garantía frente a la carga utilizada en ese periodo de evaluación. Esta ecuación se puede reducir como sigue:

$$M_C(edad) = \frac{Factor\ de\ carga}{\dfrac{Promedio\ de\ carga\ (edad)}{Carga\ máxima\ admisible}} \qquad (12)$$

El modificador de carga, como se menciona, representa la diferencia existente entre las condiciones óptimas de operación versus las condiciones de uso actuales. El modificador de carga al encontrarse en el denominador del exponente del índice de salud modificado va a implicar que, si en las condiciones de operación la carga supera el punto de garantía, este efecto le agregará deterioro al equipo, debido a que la vida estimada fue obtenida y calculada considerando el punto de garantía.

Una vez definidos estos parámetros, y calculados todos los modificadores, se puede obtener el Índice de Salud Actual Modificado (HIM). A continuación, se presenta un diagrama de influencias que permite visualizar los distintos elementos que componen el cálculo de Índice de Salud de un activo:

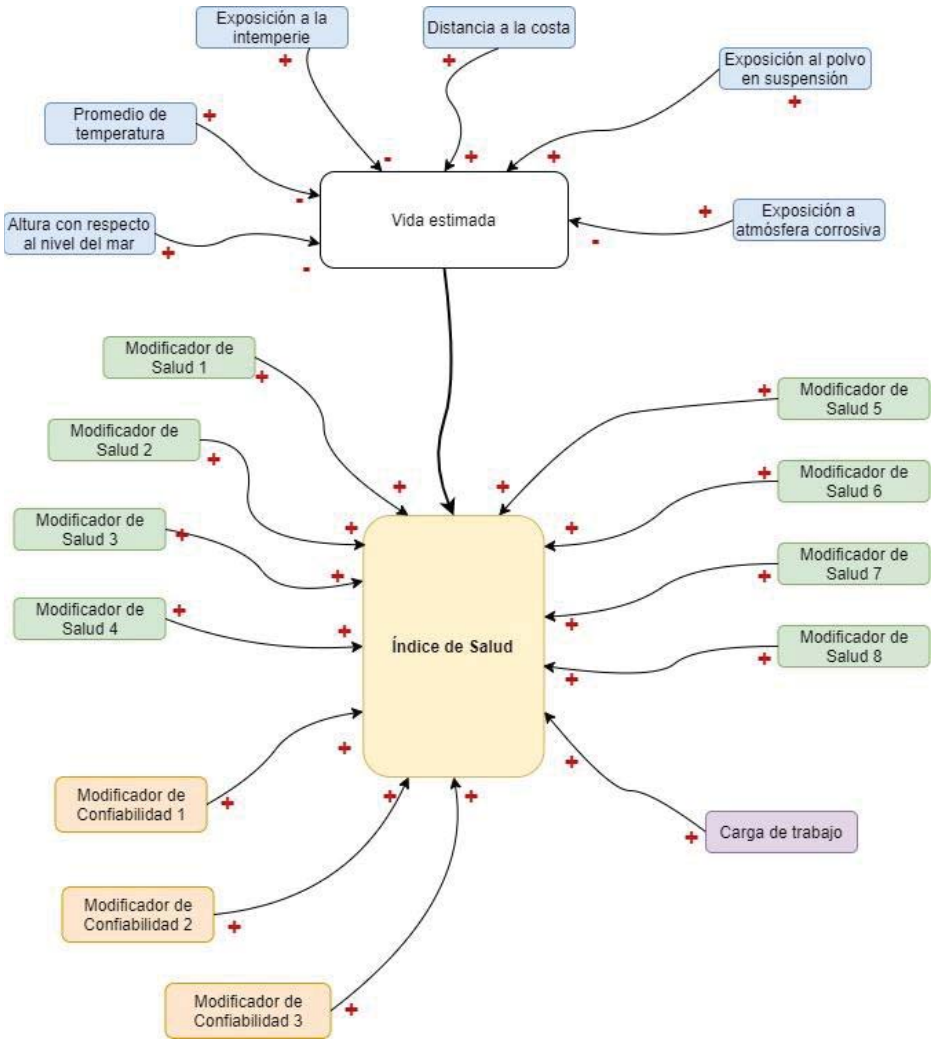

Figura 2-3: Diagrama de Influencias. Índice de Salud. Fuente: Autor

La Figura 2-3 muestra gráficamente la influencia de los distintos factores sobre el Índice de Salud de un activo determinado a nivel genérico. Los factores de emplazamiento son los factores de ubicación que afectan en la Vida Estimada del activo. Los factores de salud y confiabilidad afectan al valor del Índice de Salud del activo. Finalmente, la carga de trabajo aumenta la tasa de deterioro del activo.

El efecto que tienen los modificadores tanto de salud, de confiabilidad y de carga, se observan a modo de ejemplo en la Figura 2-4.

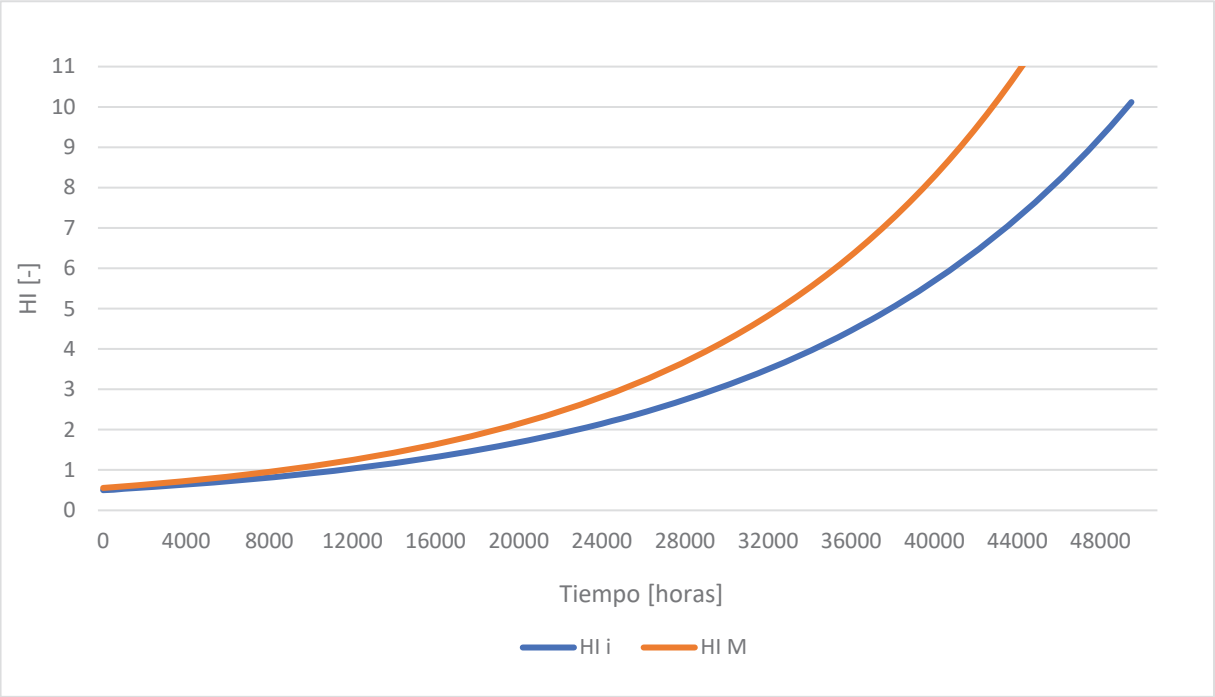

Figura 2-4: Gráfico del Índice de Salud Inicial y Modificado vs Tiempo. Fuente: Autor

El efecto de aplicar esta metodología genera resultados que son esenciales para la extensión de esta a otros activos, ya sea dentro de la misma compañía o fuera de esta.

El índice de salud de activos es un acercamiento confiable al conocimiento del estado de los equipos, a través de este es posible obtener resultados relevantes para un posterior análisis. Además, tiene un impacto importante en el diseño de estrategias de mantenimiento ya que, en función de su resultado, se puede conocer cuál es el estado del equipo en cuestión y la necesidad o no de ejecutarle el overhaul.

Cuando se decide relacionar este tópico con el ciclo de vida de los activos, el índice entregará información sobre el estado de los activos y, por tanto, sobre el periodo óptimo de recambio de este o, por otra parte, en las situaciones donde es necesario evaluar costos a futuro, el índice de salud entregará una buena aproximación para justificar cambios en el mantenimiento preventivo y correctivo.

2.2. Indicadores básicos del análisis estadístico de confiabilidad

A medida que la salud del activo va declinando, la cantidad de fallas tienden a ir en aumento, esto se debe a que principalmente la capacidad del activo de funcionar bajo la condición de "tan bueno como nuevo" posterior al overhaul sólo ocurrirá en un periodo de tiempo específico, lo que implica que a medida que pasa el tiempo aparecerán las fallas. Esto se explica a través del concepto de confiabilidad. La **confiabilidad** es la característica de un dispositivo expresada por la probabilidad de que este dispositivo cumpla con la misión requerida bajo las condiciones de uso determinadas y para un periodo de tiempo especificado, es decir, el concepto de confiabilidad tiene relación con que el elemento de estudio funcione de manera satisfactoria durante un periodo de tiempo determinado. (Crespo C. P., 2017)

El estudio de la confiabilidad primordialmente busca disminuir la incertidumbre con respecto a la ocurrencia del fallo en los activos, para esto se estudian cinco indicadores, en los cuales la variable aleatoria será definida como tiempo entre fallas (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 el fallo, $C(x)$
- La función frecuencia de fallos, $\lambda(x)$
- La media (esperanza matemática), $E(x)$ *o MTBF* (tiempo promedio hasta el fallo)

Los indicadores presentados se pueden analizar a través de diferentes distribuciones de probabilidad, en particular, para el alcance que requiere este trabajo los indicadores se determinan a través de la Distribución de Weibull.

2.2.1. Distribución de Weibull

Weibull es una distribución de probabilidad continua, la cual modela la distribución de fallos en sistemas o activos cuando la tasa de probabilidad de fallos varía en el tiempo. Es decir, estudia la variable aleatoria continua "tiempo hasta que un equipo falla". (Crespo C. P., 2017) La información requerida para la construcción de esta distribución es el historial de fallas entregada por la compañía para el equipo de estudio.

Esta distribución se describe a partir de dos parámetros: η, parámetro de escala, cuya unidad es [tiempo/fallas]; y β, parámetro de forma, adimensional, ambos parámetros se calculan a partir de los tiempos entre fallos y ambos parámetros son propios de cada equipo.

Una de las principales características de la distribución de Weibull es que el número de ocurrencia de fallos no permanece constante, porque esta sigue el comportamiento de la "curva de la bañera" (Figura 2-5), descrita por la función frecuencia de fallas, la cual es definida por el parámetro de forma, es decir, la frecuencia de falla puede crecer o decrecer con el tiempo, o permanecer relativamente constante.

El parámetro de forma, β, describe la forma de la curva λ(x) aplicado en distintos momentos de la vida del activo:

- $\beta<1$, la frecuencia de fallos $\lambda(x)$ decrece, y representa el periodo de infancia del activo. Las fallas asociadas a este periodo pueden deberse a instalaciones incorrectas o desconocimiento de un procedimiento.
- $\beta=1$, $\lambda(x)$ es constante y los tiempos hasta el fallo son relativamente constantes. Las fallas asociadas a este periodo pueden deberse a causas externas, como accidentes, mala operación, etc.
- $\beta>1$, la frecuencia de fallos $\lambda(x)$ crece, y representa la fase de envejecimiento del activo. Las fallas asociadas a este periodo se deben directamente a el desgaste natural del equipo.

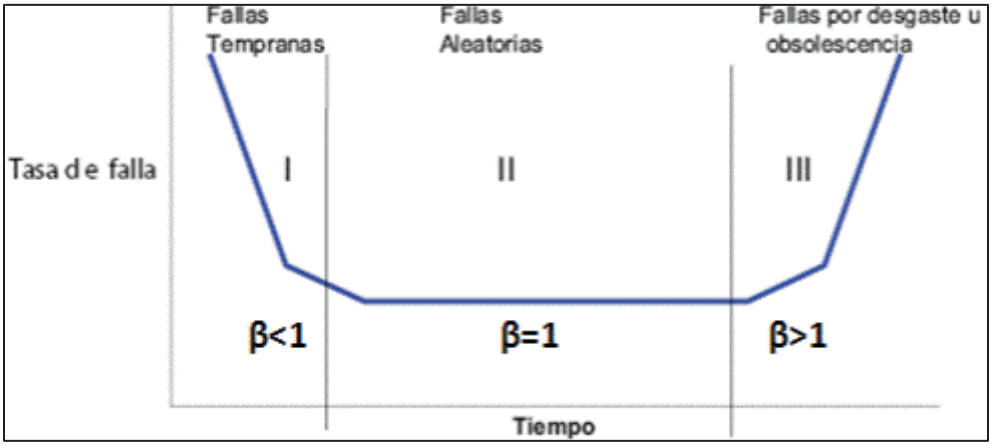

Figura 2-5: Representación gráfica de la tasa de fallas, curva conocida como "curva de la bañera". Fuente: (Salazar, 2004)

2.2.2. Indicadores de confiabilidad de la distribución de Weibull

Los principales indicadores de confiabilidad se presentan a continuación:

- La función densidad de probabilidad de fallo, *f(x)*

$$f(x) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{\left(\frac{-x}{\eta}\right)^{\beta}} \qquad (13)$$

- La función de distribución acumulada de probabilidad de fallo, *F(x)*

$$F(x) = 1 - e^{\left(\frac{-x}{\eta}\right)^{\beta}} \qquad (14)$$

- La función de distribución acumulada inversa de probabilidad de que no ocurra el fallo, *C(x)*

$$C(x) = 1 - F(x) = e^{\left(\frac{-x}{\eta}\right)^{\beta}} \qquad (15)$$

- La función frecuencia de fallos, *λ(x)*

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{C(x)} = \frac{\beta \cdot x^{(\beta-1)}}{\eta^{\beta}} \qquad (16)$$

- La media (esperanza matemática), *E(x)*

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx = MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \qquad (17)$$

Donde:

x: $variable\ aleatoria\ continua, definida\ como\ tiempo\ hasta\ el\ fallo$

η: $parámetro\ de\ escala, vida\ característica$

β: $parámetro\ de\ forma$

Γ: $función\ Gamma$

Se debe recordar, que η y β son parámetros particulares y propios de cada activo.

Estas ecuaciones entregan distribuciones probabilísticas de los fallos, permitiendo utilizarlas como una relación entre el análisis de salud de activos y el análisis de costos de ciclo de vida de los equipos.

2.3. Análisis de Costos de ciclo de vida

Para realizar el análisis de costos en el ciclo de vida de un activo se utiliza la formulación y elementos de costo recogidos en el modelo de Woodward y de Análisis de Costos de Ciclo de Vida (ACCV).

Algunas definiciones para destacar de ACCV son:

1. El ACCV es un proceso en el cual se estudia a nivel técnico y económico todos los costos implicados en la vida de un equipo o de un sistema de producción, desde su diseño inicial hasta su reemplazo, con el objetivo de poder comparar equipos y poder seleccionar el que aporte mejores beneficios a la compañía. (Woodhouse, 1997)
2. El análisis de costos de ciclo de vida se define como una herramienta que permite comparar equipos a través de los costos asociados en un determinado periodo de tiempo. Dentro de estos costos asociados se encuentra los costos de capital inicial, los de operación futuros y el cálculo de sustitución al fin de su vida útil. (ISO15686, 2017)

Al evaluar los costos del ciclo de vida de un activo de manera adecuada, y en el periodo de vida del equipo apropiado, se puede prever problemas en el diseño y a la vez, cuantificar futuros costos que permitan describir las actividades empleadas sobre el activo. (Senthil Kumaran Durairaj, 2002). En particular, el propósito al realizar el análisis de los costos de ciclo de vida es obtener información de los costos en función del posible aumento en la tasa de fallos con el fin de que se entregue la mayor cantidad de información posible para la toma de decisiones más conveniente y que asegure la mejor relación costo-beneficio posible.

Para continuar con la descripción del ACCV, se hace necesario definir los siguientes conceptos:

- Características de los costos: El costo del ciclo de vida se obtiene a través del cálculo de los costos aplicados a cada una de las fases a lo largo del ciclo de vida del activo. Todos los costos que se involucren con el ciclo de vida del activo deben ser incluidos, desde la concepción hasta la eliminación, los cuales son: costos de diseño, costos operacionales, costos de mantenimiento preventivo, costos por falla, etc.

  Es importante destacar que los costos se clasifican en dos grupos: CAPEX y OPEX y la suma de ambos grupos entregará los TOTEX (Figura 2-6). Los CAPEX son costos de capital, en donde se incorpora el diseño, la adquisición, instalación, manual, entrenamiento del personal, etc. Y los OPEX son los costos relacionados a las operaciones, en donde están incluidos la mano de obra, las actividades de operaciones, mantenimiento preventivo y correctivo, contrataciones y desincorporación.

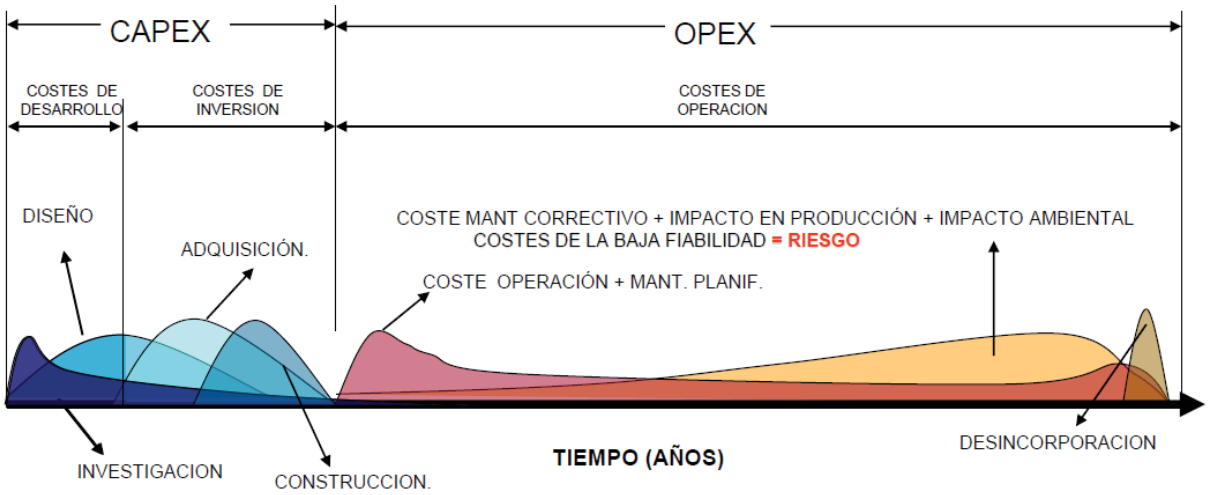

Figura 2-6: Distribución de los Costos (CAPEX y OPEX) a lo largo del tiempo. Fuente: (Parra, 2018)

La Figura 2-6 muestra una posible distribución de los costos CAPEX y OPEX a lo largo de la vida del equipo.

- Tasa de descuento: es un factor financiero que permite obtener el valor del dinero del futuro en el valor que tiene el dinero en la actualidad. La tasa de descuento permite entregar una comparativa durante el periodo de estudio ante los impactos inflacionarios o efectos económicos.

- Ciclo de vida útil esperado: se define con técnicas parecidas a la vida humana, como el promedio de años en el que se espera que funcione el activo hasta el overhaul. Es la cantidad de años de duración hasta el fin de su vida útil.

- IPC: Índice de Precios al Consumo. Se describe como un indicador que mide la inflación, es decir, es el valor numérico representativo en donde se reflejan las variaciones del costo de la vida de un periodo a otro.

$$V_f = V_0 \cdot (1 + IPC)^{n-1} \tag{18}$$

Donde:

V_f: $Es\ el\ valor\ final$

V_0: $Es\ el\ valor\ inicial$

IPC: $Es\ el\ reajuste\ del\ IPC$

n: $Es\ el\ periodo\ actual$

- VAN: Valor Actual Neto, es un cálculo en donde se obtiene el valor actual de ciertos valores futuros a través de una tasa de descuento. Es decir, es el valor que tiene el flujo de caja futuro equivalente en la actualidad. Esto es de utilidad a la hora de verse en la necesidad de comparar proyectos de inversión. Se calcula como sigue:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+k)^t} \qquad (19)$$

Donde:

I_0: $Inversión\ inicial, realizada\ en\ t = 0$

F_t: $Son\ los\ flujos\ de\ dinero\ en\ cada\ periodo\ t$

n: $Es\ el\ número\ total\ de\ periodos\ de\ tiempo$

k: $Es\ la\ tasa\ de\ descuento$

t: $Es\ el\ periodo\ actual\ de\ tiempo$

El modelo por aplicar para el cálculo del costo de ciclo de vida se basa en el modelo de Woodward del 1997, el cual se describe a continuación:

1. Se establecen las condiciones para operar el equipo y sus modos, es decir, la carga completa, media carga, sin carga.
2. Se identifican las categorías de los costos: adquisición, costos operacionales, mantenimiento programado, mantenimiento mayor, reposición.
3. Se determinan los costos por confiabilidad, es decir, los costos por falla, identificando los tipos de falla y en qué periodo ocurrieron.
4. Identificar categorías que generen mayor impacto y considerar los factores involucrados.
5. En cada categoría se realiza el reajuste correspondiente del IPC. Se precisa la tasa de descuento a aplicar, la cantidad de años a analizar y finalmente, se obtiene el cálculo de los costos a través de un flujo de caja en donde se traen a valor presente con el VAN.
6. El modelo de Woodward plantea la ecuación 20. (Woodward, 1997, Blanchard and Fabrycky, 1998).

La fórmula que describe el análisis del costo de ciclo de vida es:

$$ACCV\ (P) = \sum CI + CO + CMP + CTPF + CMM - VR \qquad (20)$$

Donde:

$ACCV$: $Costos\ totales\ del\ ciclo\ de\ vida\ , para\ tasa\ de\ descuento\ (i)\ en\ un\ periodo\ de\ vida$ útil $esperado.$

CI: $Costo\ inicial\ de\ adquisición\ e\ instalación$

CO: $Costos\ operacionales$

CMP: $Costos\ de\ mantenimiento\ preventivo$

$CTPF$: $Costos\ totales\ por\ falla$

CMM: $Costos\ de\ mantenimiento\ mayor$

VR: $Valor\ residual\ del\ activo\ al\ alcanzar\ el\ final\ de\ la\ vida$ $\acute{u}til$

Las categorías de costos operacionales, costos de mantenimiento preventivo, costos totales por fallas son valores obtenidos en el periodo de un año. El costo de mantenimiento mayor o overhaul, será considerado solamente en el periodo en el que fue realizada la actividad. Posteriormente, el análisis se realiza a través de un flujo de caja en donde todos los valores de cada una de las categorías serán reajustados a través del IPC y finalmente se reducirán al Valor Actual Neto.

2.4. Modelo de tasa de fallos según MTTF de la Distribución de Weibull

El modelo de Tasa de fallos según la distribución de Weibull es el método tradicional para el cual se obtiene la cuantificación de los costos por confiabilidad, estimados a partir de la frecuencia de fallos calculados desde la distribución de Weibull. El modelo propone lo siguiente:

- Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos.
- Calcular los correspondientes parámetros de escala y forma (η y β)
- Calcular MTTF (Tiempo entre fallas, Ecuación 17).

Con lo anterior se obtiene la frecuencia de fallas:

$$\delta_f = \frac{1}{MTTF}\left[\frac{fallas}{año}\right] \qquad (21)$$

Se debe mencionar que, al considerar esta metodología se debe tener presente que la cantidad de fallas al año se considera constante para todos los años de vida estimada del equipo.

- Posteriormente, se asigna el valor de costo unitario C_f a las fallas.

$$CTPF(A) = \sum_{f}^{F} \delta_f \cdot C_f \left[\frac{\$}{año}\right] \qquad (22)$$

Luego, estos costos se adicionan al resto de costos considerados en la expresión N° 20 a través del enfoque de un flujo de caja, posteriormente se traen a valor presente a través del uso del VAN (ecuación N°19).

3. Desarrollo del modelo

El modelo propuesto se diseña a partir de la necesidad de buscar una metodología que permita unificar las temáticas de salud de activos con el análisis de costos de ciclo de vida.

Para esto, se planteó buscar una relación entre el índice de salud inicial (HIi) y el índice de salud modificado (HIM), la idea es incorporar a la tasa de falla (λ) dicho índice, y a su vez al análisis de costo de ciclo de vida (ACCV). Para poder entender de mejor manera el procedimiento se expone en el capítulo de Anexos un Diagrama del procedimiento de la Metodología Propuesta (Figura 9-1) que permite visualizar el paso a paso.

3.1. Paso 1: Cálculo del Factor de corrección *K*

Una vez efectuado el Análisis del Índice de Salud de Activos previamente descrito se incorpora un factor *K* al procedimiento. La relación encontrada es un cociente entre los índices mencionados (HIM y HIi) este se representa por el factor denominado *K*:

$$K(t) = \frac{HIM\ (t)}{HIi\ (t)} \tag{23}$$

El factor *K* se define como el factor de corrección que permite entregar la relación entre el comportamiento real del equipo y el comportamiento teórico o el comportamiento que debiese tener según el fabricante. Este factor recoge el impacto de todos los modificadores de salud, confiabilidad y carga sobre la salud del activo para posteriormente incorporarlos a la tasa de fallas. De esta manera, el valor del factor *K*, afectado por la salud actual del equipo, se verá alterado a medida que el comportamiento del activo se vaya alejando del comportamiento teórico.

3.2. Paso 2: Cálculo de λ corregido

Posteriormente, el factor *K* se articula con la fórmula de tasa de fallas, de la siguiente manera

$$\lambda_f(t) = K(t) \cdot \lambda_i(t) \tag{24}$$

La siguiente figura muestra el efecto del factor *K* mencionado anteriormente frente a la tasa de fallas.

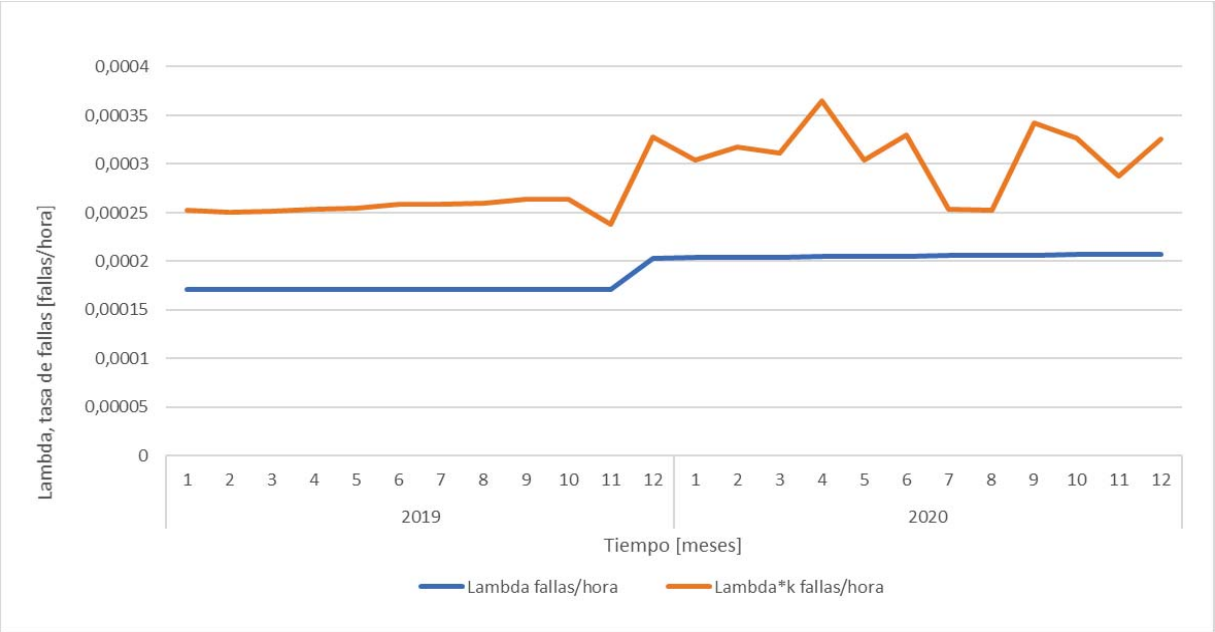

*Figura 3-1: Gráfico de Lambda (tasa de fallas) y Lambda*K vs Tiempo. Fuente: Autor*

En la figura 3-1 se observa la representación de la tasa de fallas por hora que tiene una bomba de agua de mar para cada mes en los años 2019 y 2020. Se presentan las curvas *Lambda* y *Lambda*K*: en la primera se hace notar una pequeña alza al final del año 2019, esto se explica debido a que la curva descrita por el parámetro de forma pasa de una tasa de fallos constante (parámetro de forma β=1) a una tasa de fallos en aumento (parámetro de forma β>1).

Por otra parte, la curva *Lambda*K* representa una tasa de fallas corregida con el factor *K*, en el cual se incorporan las características correspondientes a la cantidad de deterioro, el uso del equipo y la carga promedio, estos modificadores son factores que cambian mes tras mes, lo que provoca que la curva sea heterogénea con respecto a la teórica.

De esta forma se unifican las temáticas de índice de salud de activos con la tasa de falla según la distribución de Weibull.

3.3. Paso 3: Cálculo de fallas anuales

La unidad utilizada de la tasa de fallas es *[fallas/hora]*, por lo tanto, basta con realizar un simple cambio de unidad para obtener *[fallas/mes]* a través de la cantidad de horas de trabajo al mes promedio, finalmente, se suman la cantidad de fallas mensuales por los 12 meses y así se entrega el total de fallas al año.

$$\lambda_f = ((\lambda_i \cdot K_i) \cdot t_i) \tag{25}$$

Donde:

λ_f: $Cantidad\ de\ fallas\ al\ mes$

λ_i: $Cantidad\ de\ fallas\ por\ hora$

K_i: $Factor\ de\ corrección\ K\ en\ el\ periodo\ i$

t_i: $Cantidad\ de\ horas\ de\ trabajo\ durante\ el\ periodo\ i$

Finalmente se suman la cantidad de fallas en el periodo de un año, según la siguiente ecuación:

$$\lambda_f \left[\frac{fallas}{\text{año}}\right] = \sum_{1}^{12} \lambda_f \left[\frac{fallas}{mes}\right] \tag{26}$$

3.4. Paso 4: Cálculo de costos totales por fallas

Y finalmente se debe multiplicar por el costo por fallas asociado a cada equipo, la fórmula es presentada en el punto de análisis de costo de ciclo de vida:

$$CTPF = \sum_{i=1}^{F} \lambda_f \cdot C_f \left[\frac{\$}{\text{año}}\right] \tag{27}$$

Donde:

λ_f: $cantidad\ de\ fallas\ por\ \text{año}$

C_f: $Costo\ por\ cada\ falla$

$CTPF$: $Costos\ totales\ por\ fallas$

3.5. Paso 5: Corrección de la ecuación de ACCV

Es necesario corregir la ecuación de N° 27 con la relación presentada en el modelo propuesto, por lo tanto, se altera el término Costos totales por falla (CTPF) de la ecuación del Análisis de Costos de Ciclo de Vida y queda como sigue:

$$CTPF = \sum_{l=1}^{T} \left(\left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_{i\,j} \cdot \left(\frac{HIM}{HIi} \right)_j \cdot t_j \right)_l \cdot C_f \right) \qquad (28)$$

Donde:

$CTPF: Costos\ totales\ por\ falla, dinero\ necesario\ para\ cubrir\ los\ eventos\ por\ falla$

$j = 1,2, \dots, 12: Contador\ de\ meses$

$l = 1,2, \dots, T: Contador\ de\ años$

$\lambda_{i\,j}: Lambda, tasa\ de\ fallas\ en\ el\ mes\ j$

$HIi: Indice\ de\ salud\ inicial$

$HIM: Indice\ de\ salud\ modificado$

$t_f: Horas\ de\ trabajo\ en\ cada\ mes\ j$

$C_f: Costo\ por\ cada\ falla$

3.6. Paso 6: Análisis de Costo de Ciclo de Vida

Finalmente, se realiza el análisis de costos de ciclo de vida en donde se desglosan todos los costos asociados. Se concluye con la ejecución de un flujo de caja, en donde se efectúa un reajuste de cada término por el IPC y el uso del VAN que permite entregar el valor de los costos totales en valor presente.

Es importante destacar que, al aplicar la metodología propuesta, la cantidad de fallas irá en aumento año a año, debido a que se basa según la tasa de fallas de la distribución probabilística de Weibull.

Como se exponía previamente, el valor de HIM siempre es mayor que el valor de HIi, (explicado de mejor manera en la Figura 2-4), lo que implica que, en teoría, el valor de *K* será siempre mayor que 1. Esto afectará directamente a un aumento de la frecuencia de fallas y en su conjunto explica un aumento de los costos totales por fallas. Esto quiere decir que el análisis permite prever el impacto de la salud de los activos a través de los costos.

El cálculo del VAN se realiza cuando se efectúa un flujo de caja, sin embargo, si es de interés posicionar todos los términos involucrados en una sola expresión, esta queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} ACCV(P) = CI &+ \sum_{n=1}^{T} CO \cdot (1+IPC)^{n-1} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \\ &+ \sum_{n=1}^{T} CMP \cdot (1+IPC)^{n-1} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \\ &+ \sum_{n=1}^{T} \left(\left(\sum_{j=1}^{12} \lambda_{i_j} \cdot \left(\frac{HIM}{HIi}\right)_j \cdot t_j \right)_n \cdot C_f \cdot (1+IPC)^{n-1} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \right) \\ &+ CMM \cdot (1+IPC)^{n-1} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} - VR \end{aligned} \tag{29}$$

Donde:

$ACCV(P)$: $Costos\ totales\ del\ Ciclo\ de\ vida\ del\ activo\ en\ valor\ presente\ P$

CI: $Costo\ inicial\ de\ adquisición$

CO: $Costos\ operacionales$

CMP: $Costo\ de\ mantenimiento\ preventivo$

CMM: $Costo\ de\ mantenimiento\ mayor\ o\ Overhaul$

VR: $Valor\ residual\ del\ activo\ cuando\ alcanza\ el\ final\ de\ su\ vida\ útil$

$j = 1, 2, \dots, j$: $Contador\ de\ meses$

$n = 1, 2, \dots, n$: $Contador\ de\ años$

λ_{i_j}: $Tasa\ de\ fallas\ en\ el\ mes\ j$

$\left(\frac{HIM}{HIi}\right)_j = K_j: Factor\ de\ corrección\ K\ en\ el\ mes\ j$

$t_j: Horas\ de\ trabajo\ en\ el\ mes\ j$

$C_f: Costo\ por\ cada\ falla$

$IPC: Índice\ de\ Precios\ al\ Consumo$

$i: tasa\ de\ descuento$

Se debe aclarar que el mantenimiento mayor se realiza en el periodo especificado por el cálculo de la salud de activos, esto implica que en el análisis de costo se contabiliza únicamente en el o los periodos para los cuales se efectúa la actividad de overhaul.

4. Estudio de caso: Bomba de agua de mar

Para ejemplificar y validar el modelo propuesto se aplica el cálculo del Análisis del Costo de Ciclo de Vida corregido a una bomba de agua de mar instalada en la planta de GNL Quintero.

Para llegar al terminal de GNL Quintero, el Gas Natural Licuado (GNL) viaja en embarcaciones en estado líquido a -160° [C], debido a que el gas natural reduce su volumen en unas 600 veces cuando cambia a estado líquido. Una vez que es descargado el GNL desde los barcos es almacenado en los tanques de almacenamiento que están diseñados para mantener las temperaturas criogénicas del gas. Posteriormente es enviado al área de regasificación, en donde los Vaporizadores se encargan de transformar el GNL en estado gaseoso nuevamente para poder comenzar con el proceso de distribución del gas a través del gaseoducto.

El terminal cuenta con tres Vaporizadores de Panel Abierto (ORV, por sus siglas en inglés). Los ORV son básicamente intercambiadores de calor, en los cuales circula gas natural licuado en sus tuberías y estas son bañadas con agua de mar a temperatura ambiente (entre 12° y 18° [C]) que es utilizada como fuente de calor para que vuelva a transformarse en gas natural. El agua de mar entra en la parte superior del vaporizador, el GNL fluye hacia arriba y se convierte de estado líquido a gaseoso. El agua de mar es obtenida a través de un sistema de bombeo de agua de mar.

El sistema de bombeo se compone con cuatro bombas, las cuales trabajan según las necesidades de demanda de gas: una bomba cubre con las necesidades de un ORV. Las bombas de elevación de agua de mar succionan de la piscina de agua de mar, cuyo nivel va a depender del nivel del mar ya que se encuentran conectados a través de vasos comunicantes.

Con el fin de exponer el uso o aplicación y validación del modelo propuesto, se presenta un estudio de caso basado en el cálculo del costo de ciclo de vida en una de las bombas de agua de mar del sistema de bombeo descrito que opera en la planta GNL Quintero.

Figura 4-2: Sistema de Bombeo GNL Quintero, ampliación. De izquierda a derecha, Bomba A, B C y D.

Figura 4-1: Sistema de Bombeo GNL Quintero

4.1. Análisis de Salud de Activos

Paso 1: Vida Normal Estimada

Se presenta la siguiente tabla, la cual muestra todos los datos iniciales que son requeridos para efectuar un análisis de salud de activos adecuado.

Categoría del equipo	Bomba A
Fabricante	Torishima Pump
TAG del equipo	400-P-101 A
Vida normal estimada [horas]	40000
Carga en el punto de garnatía [kW]	1098
Carga máxima admisible [kW]	1300
Uso anual [horas]	4161

Tabla 4-1: Datos Operativos de la Bomba. Fuente: Autor

Paso 2: Vida Estimada

Para la obtención de la vida estimada se utiliza la ecuación N° 3, en donde se aplica el factor de emplazamiento (F_E) y el factor de carga (F_C).

Como se ha mencionado, se diseña una tabla con los factores de emplazamiento y sus valores de referencia (Tabla 4-1). Los valores que corresponden a la bomba de estudio son:

N°	Categoría	Valor
1	Distancia a la costa	1,2
2	Situación exterior/interior	1,2
3	Promedio de temperatura	1,05
4	Altura con respecto al nivel del mar	1
5	Exposición a polvo en suspensión	1
6	Exposición a atmósfera corrosiva	1,2

Tabla 4-2: Valores de factor de emplazamiento. Fuente: Autor

Cuyo valor de factor de emplazamiento final, utilizando la expresión N° 1 es 1,2. Como se había mencionado anteriormente, es posible que este factor sufra cambios a lo largo de los años, sin embargo, para este estudio se considerará igual para todo el periodo de trabajo.

Para el factor de carga, según la ecuación N° 2, es el cociente entre la carga en condiciones normales o en el punto de garantía y la carga máxima admisible, lo que su factor de carga será igual a:

$$F_C = 0{,}844$$

Obtenidos el factor de emplazamiento y el factor de carga, la vida estimada es:

$$Vida\ estimada = 39465{,}7\ [horas]$$

Paso 3: Tasa de envejecimiento

La tasa de envejecimiento se presenta en la ecuación N° 4, su resultado es:

$$\Phi = 0.000060759\ [-]$$

Paso 4: Índice de Salud Actual Inicial

Se calcula según la ecuación N° 6. Comienza con valor t=0 [horas] y se evalúa según las horas de trabajo mensuales correspondientes a la bomba, hasta que cumple el final de su vida útil.

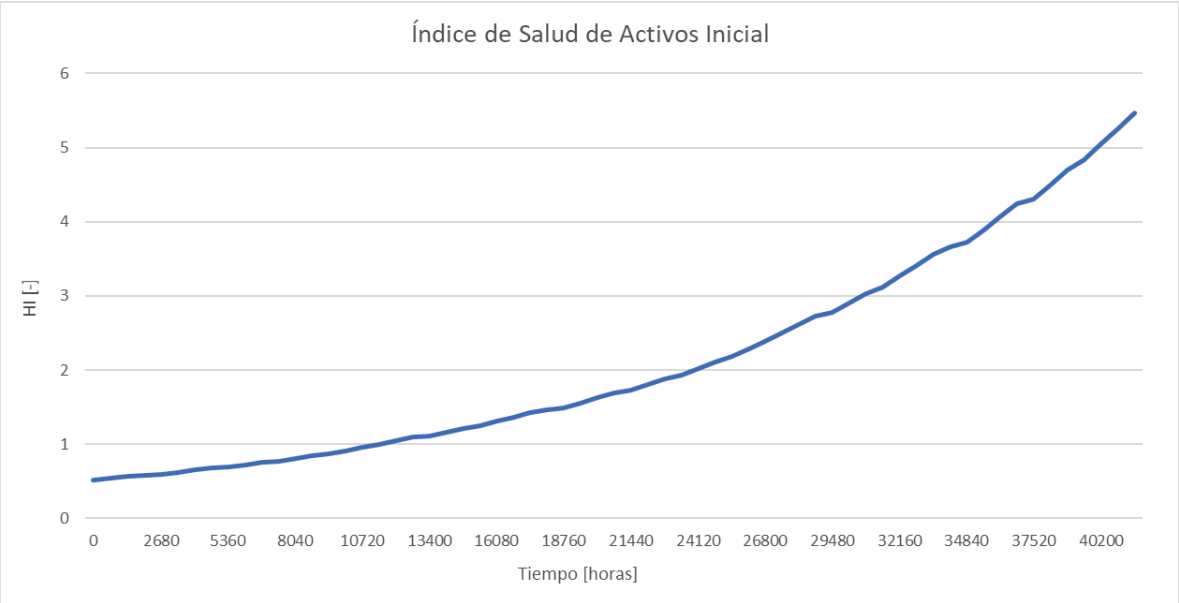

Figura 4-3: Índice de Salud Inicial de la Bomba A. Fuente: Autor

La figura 4-3 presenta el Índice de Salud para la vida teórica de la bomba que es hasta el valor de horas de la vida estimada del equipo que son 40000 horas como se muestra en la tabla 4-1.

Este gráfico representa como varía el índice de salud inicial a lo largo del tiempo, la curva tiene un comportamiento exponencial, esto implica que a medida que pasa el tiempo el estado del equipo se deteriorará hasta llegar al final de su vida útil. La curva expuesta en el gráfico representa el comportamiento teórico de la bomba, es decir, sólo considera los factores de emplazamiento, pero no los que afectan su salud.

En la teoría se menciona que cuando el equipo llega al valor de HI=5,5 se encuentra en el estado en que el valor de salud es igual al de la vida normal esperada, esto implica que si el equipo continúa operando el estado de salud irá empeorando y, a su vez, la cantidad de fallas irán apareciendo cada vez con mayor frecuencia.

Paso 5: Índice de Salud Modificado

El Índice de Salud de Activos Modificado se calcula según la ecuación N° 8, y el estudio se realiza utilizando la variable tiempo. Se debe efectuar un análisis acabado de las características de los equipos de estudio, es necesario recopilar información de las condiciones de operación, planes de mantenimiento, modos de falla para encontrar los modificadores adecuados que afecten directamente en la salud de la bomba. Como se menciona, los modificadores seleccionados son únicos para cada equipo, es decir, en caso de realizar el análisis para otro equipo es necesario considerar otros modificadores que afecten la salud del activo de manera más específica.

La presentación de los modificadores de salud seleccionados en conjunto con su justificación para la Bomba se expone a continuación:

- Nivel de deterioro: Un factor que afecta directamente en la salud del activo, se evalúa por inspección simple, ya que no hay técnicas predictivas para evaluar la edad o el estado del equipo.
- Fugas de agua de mar: La presencia de una fuga en la bomba muestra un desgaste en algún componente indicando un deterioro de piezas, adicionalmente una fuga puede generar riesgos por contacto eléctrico y al tratarse de agua salada aumenta la corrosión.
- Nivel de tanque: Si el tanque se encuentra bajo nivel, la bomba puede tener problemas en la aspiración, lo que puede traducirse en un daño del rodete, sin embargo, para el caso de las Bombas de agua de mar de GNL esto no ocurrirá debido a que las piscinas en donde están aspirando el agua se encuentran conectadas con el mar a nivel, y adicionalmente, las bombas poseen protecciones de detención ante bajo nivel de agua del tanque.
- Cantidad de puestas en marcha: En cualquier equipo rotativo el mayor desgaste se encuentra en la partida por la falta de lubricación y adicionalmente, este factor es importante debido a lo que implica sacar de la inercia a un equipo tan grande como lo son las bombas.
- Vibraciones: Se debe hacer seguimiento a las vibraciones, debido a que puede evidenciar un daño, un mal montaje de algún componente o puede implicar que algunos elementos de sujeción ya se encuentren dañados.

- Fugas de aceite: Cuando el nivel de aceite no es el adecuado puede generar roces entre piezas y aumento de temperatura en el equipo incrementando el deterioro.
- Análisis de aceite: El análisis de aceite es un procedimiento que se realiza al lubricante con el fin de entregar un diagnóstico del estado del equipo, es una muestra de su salud. A modo de ejemplo, es posible determinar grados de contaminación en los componentes internos de la bomba.
- Caudal: Un bajo caudal puede implicar un deterioro en los rodetes. Por lo tanto, es un factor importante de considerar en los modificadores.

En cuanto a los modificadores de confiabilidad se seleccionaron según los requerimientos de la bomba y también según la experiencia de otros ejemplos del cálculo.

Los modificadores de salud revelan distintos aspectos de la condición del activo, por lo tanto, es necesario referenciar su implicancia en el índice de salud y en su deterioro. A continuación, se presentan dos tablas con los modificadores en conjunto con las referencias diseñadas correspondiente a cada factor:

MODIFICADORES DE SALUD					
N°	**Categoría**	**Alto**	**Medio**	**Como nuevo**	
1	Nivel de deterioro	1,1	1,05	1	
N°	**Categoría**	**Sin fuga**	**Leve**	**Mucha fuga**	
2	Fugas de agua de mar	1	1,05	1,1	
N°	**Categoría**	**Nivel óptimo**	**Nivel de alerta**	**Nivel crítico**	
3	Nivel del tanque	1	1,1	1,2	
N°	**Categoría**	**Menos que 60**	**60 - 120**	**120 a 180**	**Más que 180**
4	Números de puesta en marcha	1	1,1	1,15	1,2
N°	**Categoría**	**Bueno**	**Seguimiento**	**Alerta**	**Peligro**
5	Vibraciones	1	1,1	1,2	1,25
N°	**Categoría**	**Sin fuga**	**Leve**	**Mucha fuga**	
6	Fugas de aceite	1	1,05	1,1	
N°	**Categoría**	**Seguimiento**	**Satisfactorio**	**No Satisfactorio**	
7	Análisis de aceite	1,2	1	1,3	
N°	**Categoría**	**Por encima del rango óptimo**	**Dentro del rango óptimo**	**Por debajo del rango óptimo**	
8	Caudal	1,1	1	1,2	

Tabla 4-3: Modificadores de Salud y sus referencias. Fuente: Autor

MODIFICADORES DE CONFIABILIDAD				
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**
3	Confiabilidad con respecto al promedio	1	1,05	1

Tabla 4-4: Modificadores de Confiabilidad y sus referencias. Fuente: Autor

Las Tablas 4-4 y 4-5 presentan categorías en las que la salud de la bomba puede verse afectada, para esto se diseñan los valores de referencia con el fin de otorgarle mayor impacto a las situaciones en las cuales lo requiera. Por ejemplo, para la categoría vibraciones, entregará un valor mayor en caso de que el equipo se encuentre en un estado de alerta.

Para continuar con el estudio se debe aclarar lo siguiente:

- El estudio se realizó a partir de enero del año 2016, posterior a un overhaul efectuado a final del año 2015, por lo tanto, se asume que el equipo opera en la condición “as good as new”.
- El periodo de estudio completo, son 10 años.
- Cada edad registrada representa un mes de funcionamiento.
- Las horas de trabajo son recopiladas del historial de datos entregado por GNL Quintero. Y todos los meses la bomba trabaja distinta cantidad de horas, dependiendo exclusivamente de las demandas de GN que se requieren.
- La elección de los modificadores se realizó en conjunto con el equipo de GNL Quintero.
- Los datos de los modificadores Número de puestas en marcha, Análisis de Aceite, Número de Overhauls, % de inactividad son recopilados a través del historial de datos de horas de trabajo entregados por GNL Quintero.
- Después de cada Overhaul realizado todos los modificadores comienzan en su valor más bajo. Los modificadores Nivel de deterioro, Vibraciones y Fugas de aceite se alteran cada 30 meses, aumentando al valor siguiente de la escala de referencias

mostrado en la Tabla 4-3, a modo de representar el deterioro propiamente tal del equipo a través del tiempo.

Para continuar con el Cálculo del Índice de Salud Modificado de la Bomba A, se decidió hacer 6 casos de estudio, los cuales son:

- **Caso 1: Caso Teórico.** El Overhaul se realiza a las 40000 horas de trabajo, que son las horas de vida estimada del equipo.
- **Caso 2: Caso HI=4.** El Overhaul se realiza cuando el índice de salud modificado alcanza o supera el valor de 4.
- **Caso 3: Caso HI=5,5.** El Overhaul se realiza cuando el índice de salud modificado alcanza o supera el valor de 5,5.
- Caso Overhaul Económico o Deficiente:
    - **Caso 4: Caso Teórico.** Se realiza un overhaul deficiente a las 40000 horas, que son las horas de vida estimada del equipo.
    - **Caso 5: Caso HI=4.** Se realiza un overhaul deficiente cuando el índice de salud modificado alcanza o supera el valor de 4.
    - **Caso 6: Caso HI= 5,5.** Se realiza un overhaul deficiente cuando el índice de salud modificado alcanza o supera el valor de 5,5.

Cuando a un equipo se le efectúa un Overhaul, este queda en la condición de tan bueno como nuevo ("as good as new"), sin embargo, un Overhaul deficiente no entregará el equipo a la condición descrita, las fallas comienzan a aparecer más tempranamente en comparación cuando el Overhaul es correctamente realizado y el procedimiento tendrá un costo de un 50% menor que el tradicional. En cuanto al caso de estudio propiamente tal, los valores de los modificadores comenzarán en su valor más bajo y se alterarán al siguiente valor de la escala de referencias de la Tabla 4-3 cada 18 meses, a modo de representar el deterioro propiamente tal del equipo a través del tiempo cuantificando la calidad del Overhaul realizado.

Es importante mencionar, que los modificadores son valores que a través del tiempo se ven afectados, y esto puede deberse a diferentes razones, tales como al uso propiamente tal del equipo, por la cantidad de puestas en marcha o simplemente por una inspección visual en donde se observa un nivel de deterioro considerable a la inspección pasada.

A modo de resumen, la siguiente figura presenta un diagrama de influencias que entrega el efecto que tienen los factores que influyen en la vida estimada y en el índice de salud.

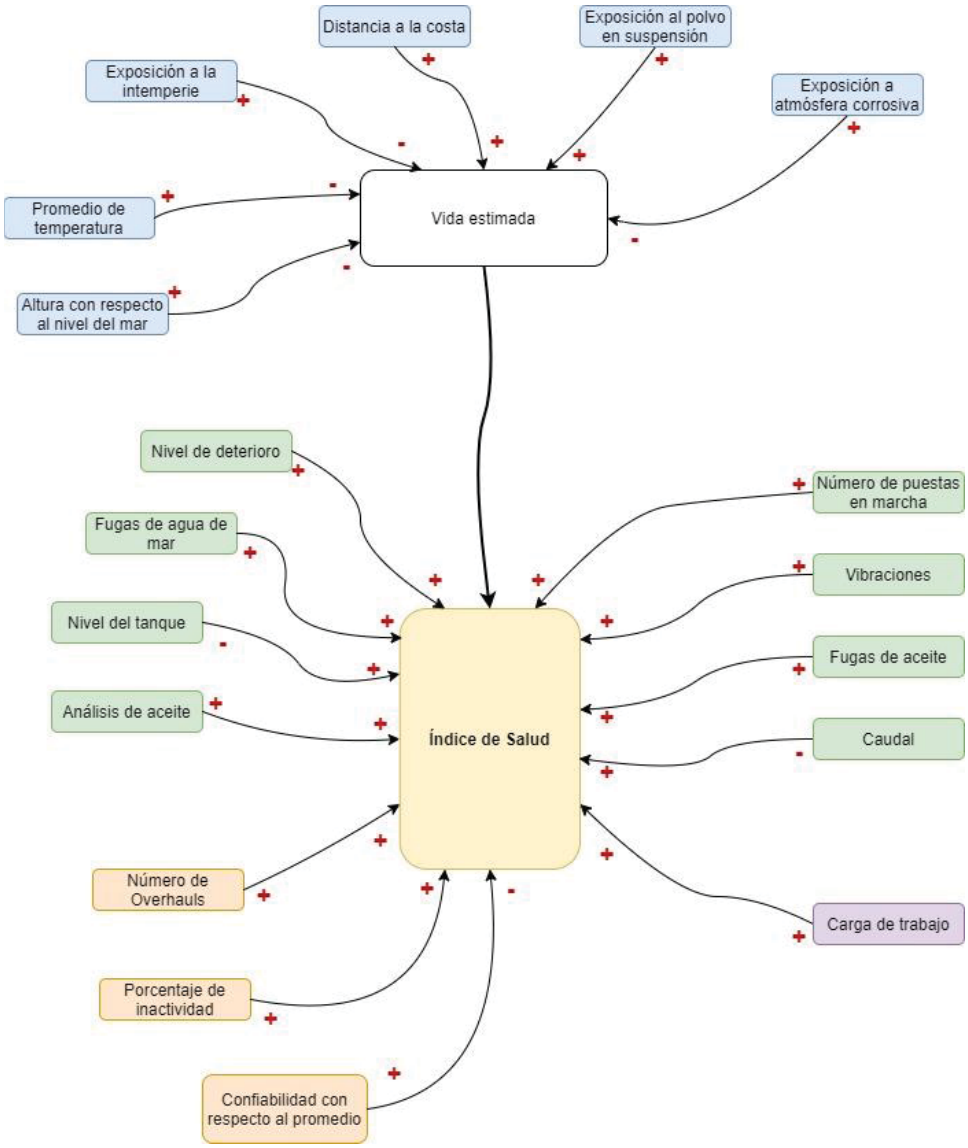

Figura 4-4: Diagrama de Influencias para el Índice de Salud. Fuente: Autor

La figura 4-4 muestra el efecto que tienen el factor de emplazamiento sobre la Vida Estimada y los modificadores de salud, confiabilidad y carga sobre el Índice de Salud. Este tipo de diagramas permite obtener información directa con respecto a la función de los factores sobre los ítems a evaluar.

En particular, se decidió ordenar por colores: color azul indica los factores de emplazamiento que afectan directamente al valor de la Vida Estimada, color verde son los modificadores de salud, color naranjo son los modificadores de confiabilidad y finalmente color morado es el modificador de carga, estos últimos tres afectan directamente al valor del Índice de Salud Modificado. Los signos + y – indican si aumenta o disminuye la cantidad del factor o del ítem. Por ejemplo, si la distancia a la costa aumenta, es decir, en el caso de que el equipo sea relocalizado, va a implicar que aumenta la vida estimada, o si aumenta el nivel de vibraciones va a aumentar el Índice de Salud implicando un deterioro en el equipo.

Por otra parte, en cuanto al modificador de carga, como se ha mencionado anteriormente, se calcula según la ecuación N° 11, y al verse influenciado directamente por las horas de trabajo mensuales, el valor final del modificador de carga también cambiará todos los meses.

Se debe mencionar que en los ítems de carga y caudal ambos extremos (muy bajo o, muy alto) son negativos en la implicancia sobre el Índice de Salud.

El estudio del índice de salud de activos se realiza con una variación de tiempo mensual (dependiendo exclusivamente del uso del equipo por parte de los requerimientos de la empresa), por un periodo de 10 años, específicamente desde el año 2016 hasta el año 2025. Los datos obtenidos se realizaron desde mediciones de carga para la Bomba A del sistema de bombeo específicamente en los años 2016 y 2017, para los años siguientes se proyectaron los datos según los resultados entregados en los años mencionados.

- **Caso 1: Caso Teórico**

Los resultados obtenidos incorporando los modificadores respectivos en la Ecuación N° 8 son los presentados en la Figura N° 4-5:

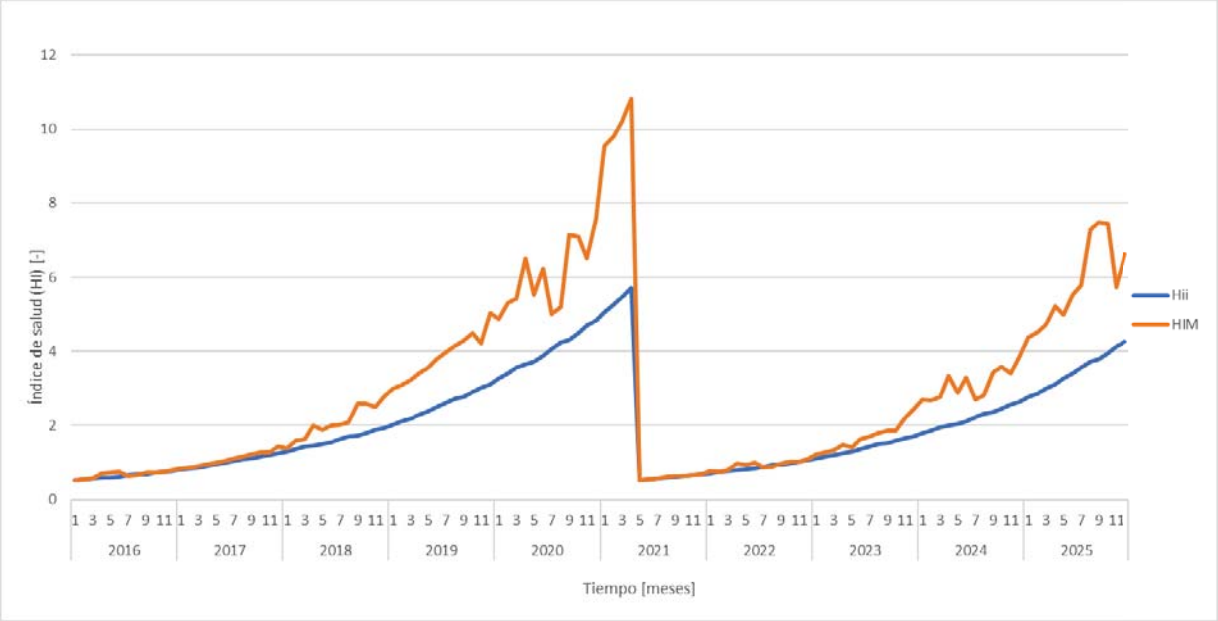

Figura 4-5:Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 1. Fuente: Autor

Como se ha mencionado, para este caso se realiza el overhaul a las 40000 horas de trabajo, es por lo que se observa la abrupta caída de las curvas, las cuales son la curva del índice de salud inicial (HIi) y la curva del índice de salud modificado (HIM), el efecto de los modificadores de salud y confiabilidad se observa en esta última, se observa que, en principio, se asemeja a la curva teórica, pero ya pasado el tiempo comienza a alejarse llegando a sobrepasar el valor HI=10, como se ha mencionado anteriormente, este efecto se debe únicamente al valor de los modificadores de salud y confiabilidad, sin embargo, la curva presenta variabilidad, y esto se debe a que las horas de trabajo no son constantes, varían mes a mes, por lo tanto, se ve afectado el modificador de carga.

- **Caso 2: Caso Teórico con Overhaul Deficiente**

Los resultados obtenidos incorporando los modificadores respectivos en la Ecuación N° 8 son los presentados en la siguiente figura:

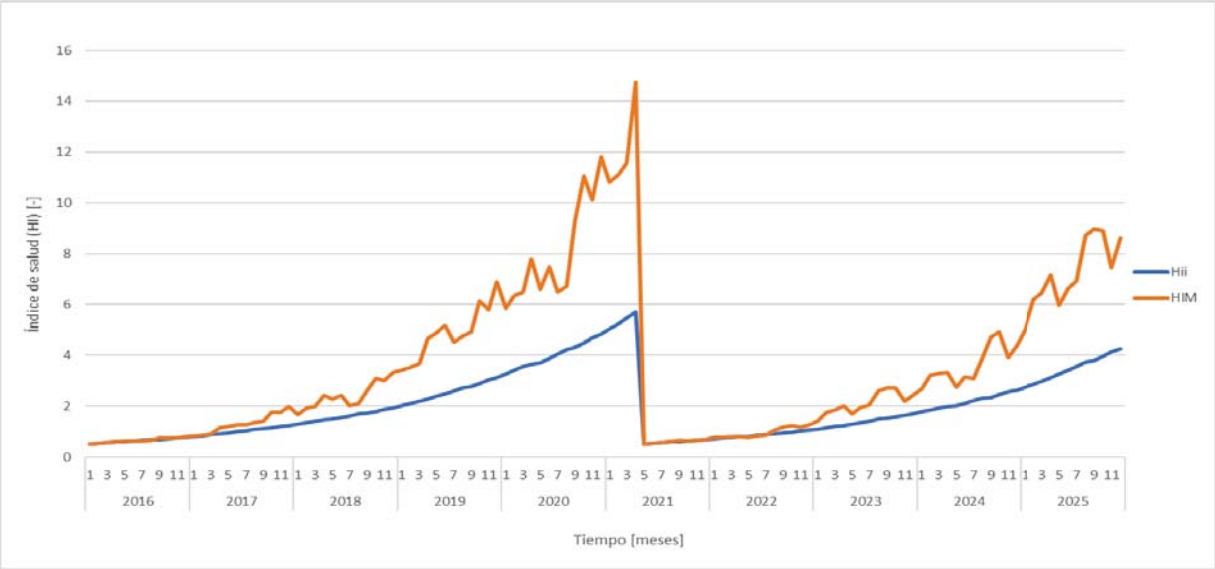

Figura 4-6: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 2. Fuente: Autor

La figura N° 4-6 muestra el índice de salud inicial y modificado para el Caso 2. Acá se observa que la calidad del Overhaul realizado provoca en la curva de *HIM* una mayor diferencia con la curva teórica con respecto al Caso 1, previamente presentado. Acá la curva se aleja más prontamente de *HIi* y esto se debe a que los modificadores se ven afectados antes. Por otra parte, al realizar el Overhaul a las 40000 horas, el peak de la curva de *HIM* (sobrepasando el valor de 14) será mucho mayor que el Caso 1 (sobrepasa el valor de 10). De hecho, el valor de HI=10 lo alcanza cercanos a octubre del 2020. En conclusión, un Overhaul Deficiente afectará en la salud del activo en mayor modo que si el Overhaul se realizase de manera correcta.

- **Caso 3: Caso HI=4**

Los resultados obtenidos incorporando los modificadores respectivos en la Ecuación N° 8 son los presentados en el gráfico de la Figura 4-7. En esta figura muestra el índice de salud inicial y modificado para el Caso 3, acá se observa que se realiza el Overhaul cuando el *HIM* llega al valor de 4, implicando que en el mismo periodo de tiempo lleguen a aplicarse dos Overhauls.

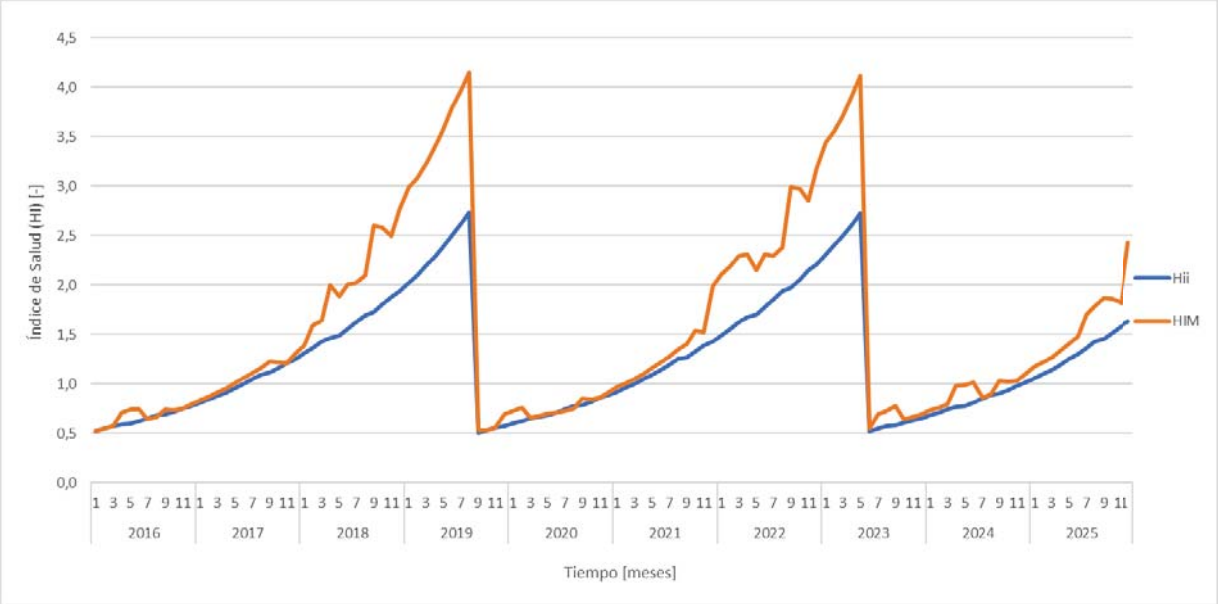

Figura 4-7: Gráfico del Índice de Salud de Activo vs Tiempo de la Bomba para el Caso 3. Fuente: Autor

- **Caso 4: Caso HI=4 Overhaul Deficiente**

Los resultados obtenidos incorporando los modificadores respectivos en la Ecuación N° 8 son los presentados en la siguiente figura:

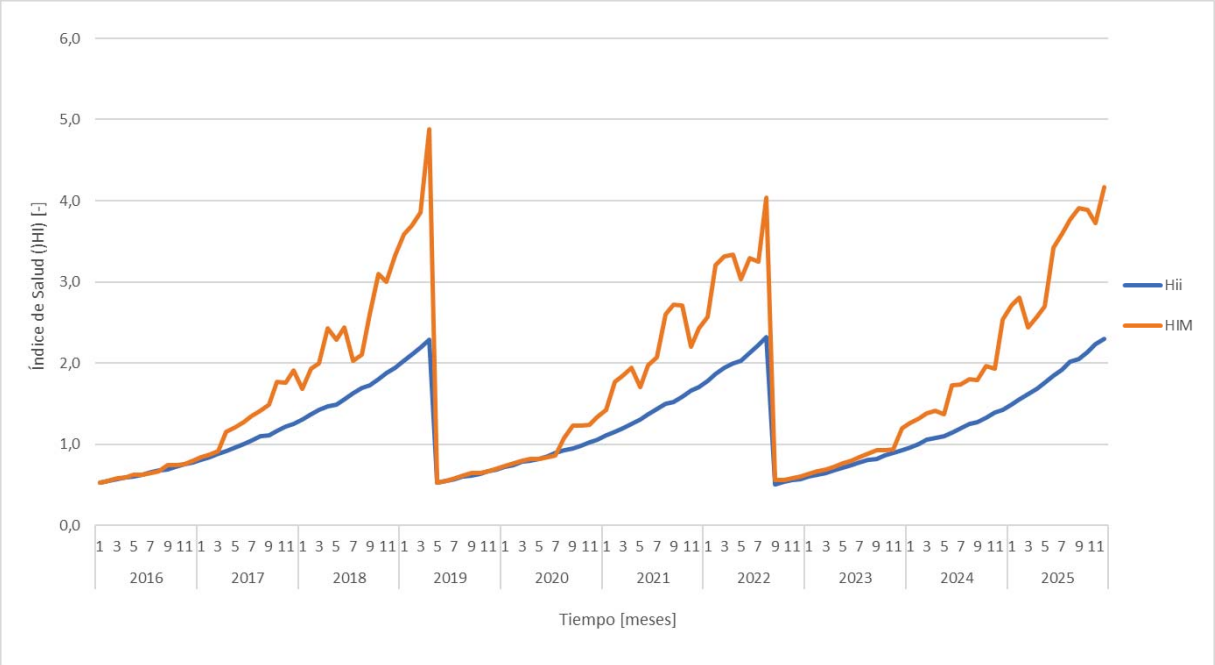

Figura 4-8: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 4. Fuente: Autor

La figura 4-8 muestra el índice de salud inicial y modificado para el Caso 4. Como se observa, los modificadores afectan en mayor medida la salud de la bomba debido al overhaul deficiente, lo que a su vez provoca que los peaks de la curva *HIM* ocurran antes que para el Caso 3. Por otra parte, la curva *Lambda*K* al final del periodo sobrepasa el valor de HI=4 lo que indica que le corresponde la realización de un overhaul, es decir, que para un análisis posterior al año 2025, la bomba comenzará con un overhaul recientemente efectuado.

- **Caso 5: Caso HI=5,5**

Los resultados obtenidos incorporando los modificadores respectivos en la Ecuación N° 8 son los presentados en la siguiente figura:

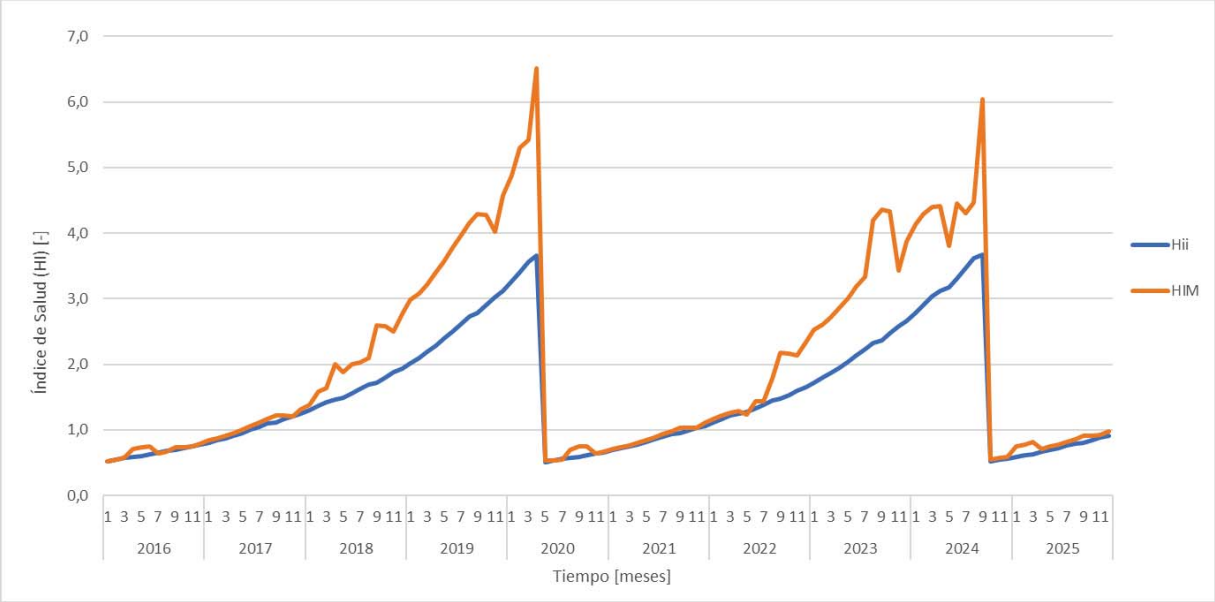

Figura 4-9: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 5. Fuente: Autor

La figura 4-9 muestra el índice de salud inicial y modificado para el Caso 5. Como se observa, el overhaul se realiza cuando el *HIM* sobrepasa el valor de 5.5, esto implica que se realicen dos overhauls en el mismo periodo de tiempo. Sin embargo, los peaks de la curva *HIM* llegan a mayor valor que para el Caso 3: Caso HI=4, esto provocará que aumenten la cantidad de fallas, lo cual se detallará más adelante.

- **Caso 6: HI=5,5 Overhaul Deficiente**

Los resultados obtenidos incorporando los modificadores respectivos en la Ecuación N° 8 son los presentados en la figura N° 4-10:

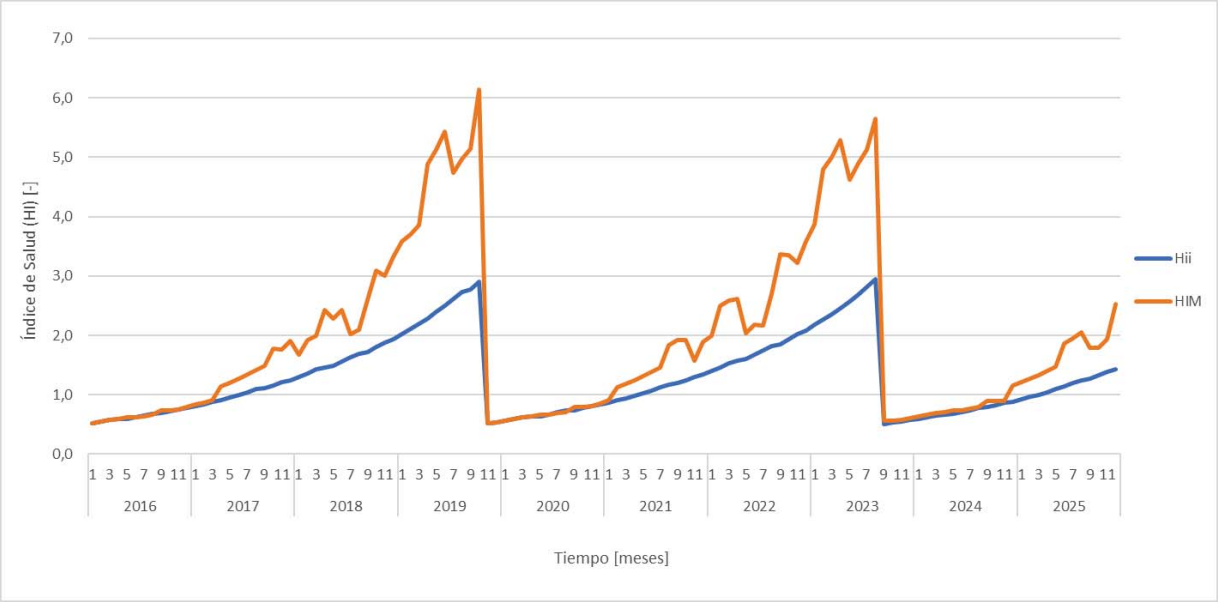

Figura 4-10: Gráfico del Índice de Salud de Activos vs Tiempo de la Bomba para el Caso 6. Fuente: Autor

La Figura 4-10 muestra el índice de salud inicial y modificado para el Caso 6, acá se observa que los modificadores afectan en mayor medida la salud de la bomba debido a la calidad del overhaul, los peaks de la curva de *HIM* ocurren más pronto que en el Caso 5 y, a su vez, la realización del overhaul.

Se debe aclarar, que todas las curvas de HIM de las figuras presentadas tienen irregularidades, es decir, son heterogéneas con respecto a la curva HIi, esto se debe a que existen variaciones en las horas mensuales de trabajo, lo que se refleja en el Modificador de Carga, el cual afecta directamente la forma de la curva, sin embargo, se logran distinguir la forma exponencial de la curva.

4.2. Cálculo del Factor *K*

Para cada caso se continúa con la relación de expresión N° 23, es decir, se obtuvo el factor de corrección bajo la relación entre HIM y HIi para cada caso expuesto a lo largo de todos los meses de trabajo en el periodo de tiempo de estudio y finalmente se obtuvo el valor de *K(t)*, el cual se utilizó incorporándolo en la tasa de fallas. A modo de ejemplo, se presenta la siguiente tabla de valores:

Año	Mes	Horas de trabajo mensuales	Horas de trabajo acumulado	Hii	HIM	k	Lambda fallas/hora	Lambda*k fallas/hora
2016	1	744	744	0,523	0,551	1,053	0,000171	0,000180
	2	687	1431	0,545	0,576	1,055	0,000171	0,000180
	3	744	2175	0,571	0,603	1,056	0,000171	0,000180
	4	433	2608	0,586	0,742	1,266	0,000171	0,000216
	5	282	2891	0,596	0,777	1,304	0,000171	0,000223
	6	709	3600	0,622	0,781	1,255	0,000171	0,000214
	7	742	4342	0,651	0,673	1,034	0,000171	0,000177
	8	692	5034	0,679	0,700	1,031	0,000171	0,000176
	9	274	5308	0,690	0,775	1,123	0,000171	0,000192
	10	707	6015	0,721	0,772	1,072	0,000171	0,000183
	11	711	6726	0,752	0,789	1,049	0,000171	0,000179
	12	491	7217	0,775	0,833	1,074	0,000171	0,000183
2017	1	714	7931	0,810	0,881	1,088	0,000171	0,000186
	2	640	8571	0,842	0,915	1,087	0,000171	0,000186
	3	658	9229	0,876	0,954	1,090	0,000171	0,000186
	4	718	9946	0,915	1,003	1,096	0,000171	0,000187
	5	741	10687	0,957	1,053	1,100	0,000171	0,000188
	6	713	11401	1,000	1,109	1,109	0,000171	0,000189
	7	743	12143	1,046	1,162	1,112	0,000171	0,000190
	8	741	12885	1,094	1,220	1,115	0,000171	0,000190
	9	274	13159	1,112	1,284	1,155	0,000171	0,000197
	10	707	13866	1,161	1,342	1,156	0,000171	0,000197
	11	711	14576	1,212	1,334	1,100	0,000171	0,000188
	12	491	15068	1,249	1,512	1,211	0,000171	0,000207

*Tabla 4-5: Valores del Índice de Salud inicial y modificado, factor K y tasas de falla: Lambda y Lambda*K para el periodo de 24 meses, años 2016 y 2017.*

En la Tabla 4-5 se presentan los valores de *HIi*, *HIM*, *K*, *Lambda [fallas/hora]* y *Lambda*K [fallas/hora]* para los meses de enero a diciembre del año 2016 y 2017. Adicionalmente se presentan las horas de trabajo mensuales y su acumulado. En principio, se observa que los valores de HIM varían como se había expuesto en las figuras de 4-7 a 4-12. Esto se debe a que los valores de horas de trabajo mensuales varían mes a mes, presentándose en la tercera columna de la tabla. Por otra parte, es importante observar que Lambda muestra los mismos valores para todo el periodo esto se debe a que el parámetro de forma (β) de la Distribución de Weibull es igual a 1, (el valor de β será detallado más adelante). Por otra parte, el valor del factor de corrección *K* se va alterando mes a mes, al ser una relación entre HIM y HIi, lo que provoca que varíen los valores de *Lambda*K*.

Al continuar con el procedimiento, para cada caso anterior se obtiene la tasa de fallas a través de la Distribución de Weibull descrita previamente.

4.3. Tasa de fallas según Distribución de Weibull

Para los datos de Weibull se utiliza información otorgada directamente desde GNL Quintero, la cual se describe en la siguiente tabla:

Datos de Weibull		
	0-30000 horas	>30000 horas
alfa	5856,13	5856,13
beta	1	1,1

Tabla 4-6: Datos de Weibull. Fuente: GNL Quintero. Diseño: Autor

Como se observa en la Tabla 4-6, la bomba no presenta periodo de infancia, lo que implica que la tasa de fallos será constante por las primeras 30000 horas de trabajo, posterior a esas horas de trabajo la tasa de fallos irá en aumento debido a que el parámetro de forma β es mayor a 1.

Se procede a obtener la tasa de fallas, $\lambda(t)$ [fallas/horas] para cada caso según la ecuación N° 16, y en conjunto con eso, se procede a multiplicar por $K(t)$, (se observa el efecto de la aplicación de $K(t)$ en la Tabla 4-5), como se presentó en la expresión N° 24. Los resultados para cada caso de estudio se exponen a continuación.

- **Caso 1: Caso Teórico**

Los resultados obtenidos incorporando el factor de corrección sobre la tasa de fallas de la ecuación N° 24 se observa en la siguiente figura:

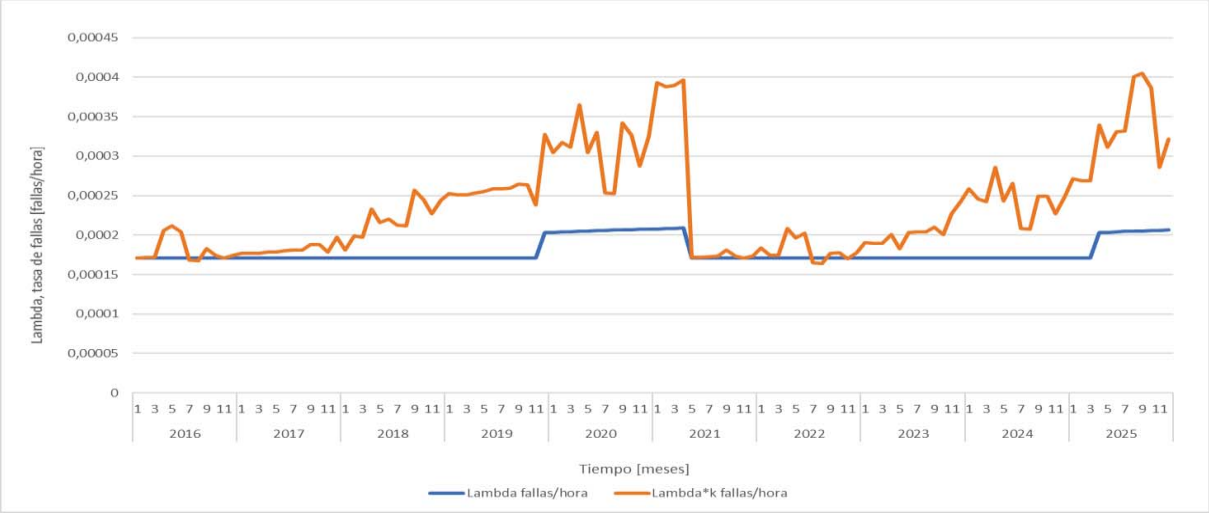

Figura 4-11: Gráfico de la tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 1. Fuente: Autor

Año	Fallas totales al año	Fallas totales al año*K	Porcentaje de aumento
2016	1,232	1,352	110%
2017	1,341	1,493	111%
2018	1,232	1,602	130%
2019	1,356	2,035	150%
2020	1,484	2,206	149%
2021	1,443	1,998	138%
2022	1,232	1,359	110%
2023	1,341	1,655	123%
2024	1,232	1,748	142%
2025	1,539	2,542	165%

Tabla 4-7: Fallas totales antes y después de la aplicación del factor de corrección en cada año con su respectivo porcentaje de aumento. Caso 1. Fuente: Autor

En la figura 4-11 se observa la tasa de fallas en *[fallas/hora]* para el Caso 1. Se aprecia que la curva Lambda (tasa de fallas) se mantiene constante y posteriormente se eleva cuando

sobrepasa las 30000 horas de trabajo, sin embargo, vuelve a bajar una vez realizado el overhaul. Como se había mencionado en el punto anterior, la salud del activo se ve afectada según los modificadores, y con esto la relación *K(t)*. Es por esta razón que aumentan la tasa de fallas para la curva *Lambda*K*. La heterogeneidad de la forma de la curva *Lambda*K* es únicamente explicada por el efecto del factor de corrección *K*, estas variaciones se deben al impacto de los modificadores de salud y carga específicamente.

En la Tabla 4-7 se resume las fallas totales al año para la bomba. Se muestra que en promedio la cantidad de fallas aumenta en un 133% aplicando la metodología propuesta. Se debe aclarar que las tasas de fallas se presentan con valores decimales, sin embargo, para el análisis de costo de ciclo de vida se utiliza en valores enteros.

- **Caso 2: Caso Teórico con Overhaul Deficiente**

Los resultados obtenidos incorporando el factor de corrección sobre la tasa de fallas de la ecuación N° 24 se observa en la siguiente figura:

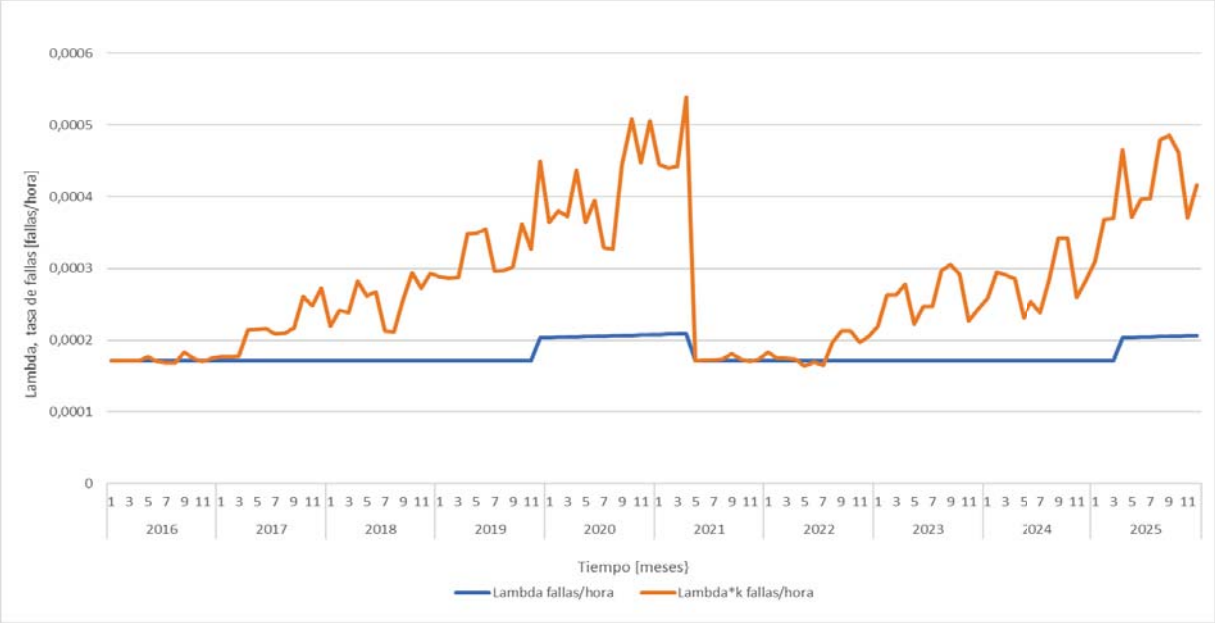

Figura 4-12: Gráfico de la Tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 2. Fuente: Autor

La figura 4-12 presenta la tasa de fallas en *[fallas/hora]* para el Caso 2. Al comparar la Figura 4-12 con la Figura 4-11, a simple vista se observa que hay un aumento en la cantidad de fallas y se comprueba con la Tabla 4-8. El aumento de fallas incorporando el factor *K* es de un 156% en promedio, el cual es mayor al caso anterior, esto se debe únicamente a la calidad del Overhaul realizado: cuando el overhaul se realiza con calidad deficiente provoca que los modificadores se alteren más prontamente que en el caso anterior, implicando, a su vez, en la tasa de fallas.

Año	Fallas totales al año	Fallas totales al año* K	Porcentaje de aumento
2016	1,232	1,239	101%
2017	1,341	1,687	126%
2018	1,232	1,813	147%
2019	1,356	2,571	190%
2020	1,484	2,901	196%
2021	1,443	2,162	150%
2022	1,232	1,336	108%
2023	1,341	2,012	150%
2024	1,232	2,012	163%
2025	1,539	3,172	206%

Tabla 4-8: Fallas totales antes y después de la aplicación del factor de corrección en cada año con su respectivo porcentaje de aumento. Caso 2. Fuente: Autor

- **Caso 3: Caso HI=4**

Los resultados obtenidos incorporando el factor de corrección sobre la tasa de fallas de la ecuación N° 24 se observa en la siguiente figura:

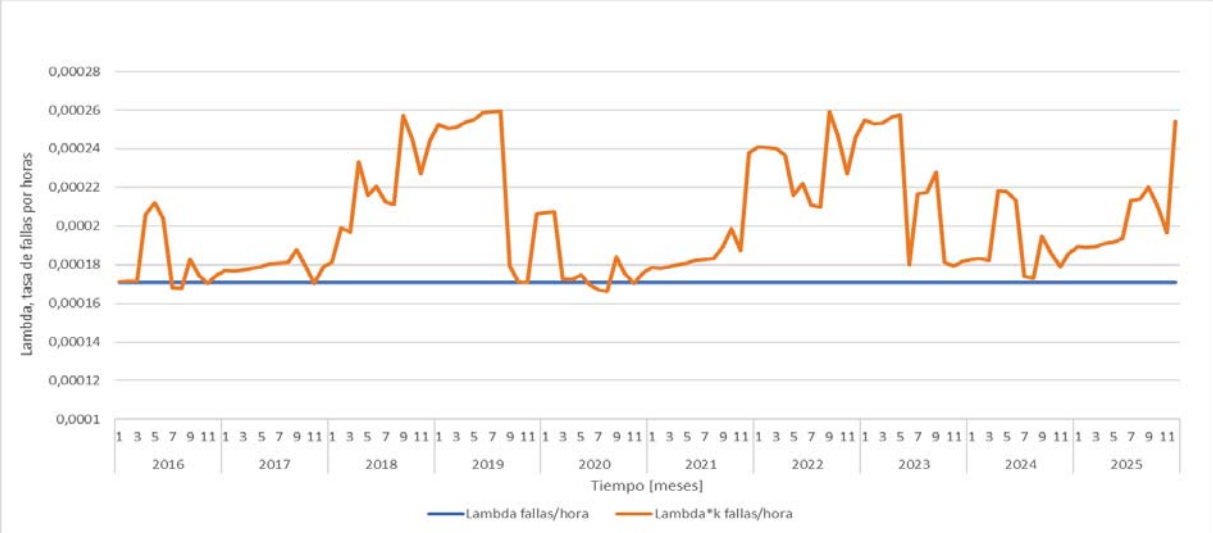

Figura 4-13: Gráfico de la Tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 3. Fuente: Autor

La figura 4-13 presenta la tasa de fallas en *[fallas/hora]* para el Caso 3. Acá se observa que el Overhaul se realiza antes de llegar a las 30000 horas, por lo tanto, el parámetro de forma (β) es igual a 1 durante todo el periodo lo que provoca que la curva *Lambda* sea constante, sin embargo, al multiplicar por el factor de corrección *K* la tasa de fallas se ve afectada debido a las variaciones de los modificadores de carga, salud y confiabilidad.

Por otra parte, la metodología permite detectar en este gráfico el momento en que se realiza el overhaul, observando que las fallas son mayores en los meses antes de realizar el overhaul (final del 2019) y menores posterior a este.

- **Caso 4: HI=4 Overhaul Deficiente**

Los resultados obtenidos incorporando el factor de corrección sobre la tasa de fallas de la ecuación N° 24 se observa en la siguiente figura.

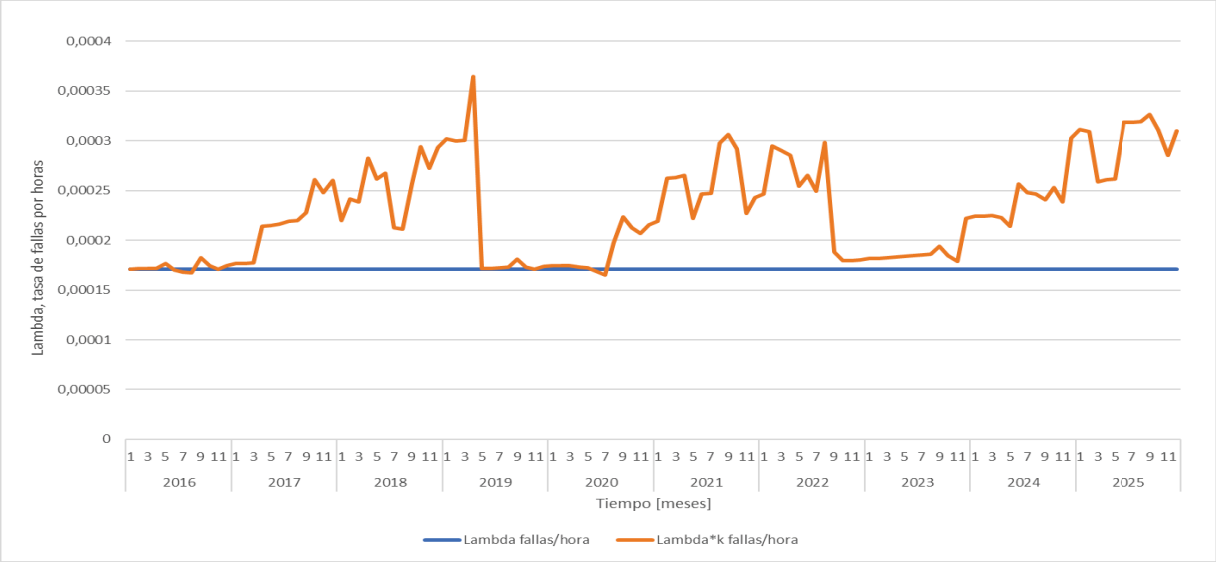

Figura 4-14: Gráfico de la Tasa de fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 4. Fuente: Autor

La figura 4-14 presenta la tasa de fallas en *[fallas/hora]* para el Caso 4. Acá se observa que ocurre un efecto similar que en el caso anterior: el parámetro de forma (β) mantiene su valor (igual a 1) debido a que el overhaul se realiza antes de las 30000 [horas], por lo que la curva de *Lambda* se mantiene constante a lo largo de todo el periodo, sin embargo, en la curva *Lambda*K* los valores son mayores que en el Caso 3 y esto se debe únicamente a la calidad del overhual realizado. De la misma manera que en el Caso 3, se logra evidenciar los momentos en los cuales se les realiza el overhaul: se observan dos caídas en la curva *Lambda*K* (años 2019 y 2023), explicadas porque la tasa de fallas aumenta en el momento antes de realizado el overhaul y disminuye posterior a este.

La comparación entre el Caso 4 y el Caso 3 se observa en la Tabla 4-9.

	Caso 3			Caso 4		
Año	Fallas totales al año	Fallas totales al año * K	Porcentaje de aumento [fallas/año]	Fallas totales al año	Fallas totales al año * K	Porcentaje de aumento [fallas/año]
2016	1,232	1,288	105%	1,232	1,239	101%
2017	1,341	1,401	105%	1,341	1,700	127%
2018	1,232	1,565	127%	1,232	1,813	147%
2019	1,341	1,839	137%	1,341	1,752	131%
2020	1,232	1,291	105%	1,232	1,346	109%
2021	1,341	1,466	109%	1,341	2,003	149%
2022	1,232	1,673	136%	1,232	1,772	144%
2023	1,341	1,743	130%	1,341	1,461	109%
2024	1,232	1,357	110%	1,232	1,744	142%
2025	1,341	1,588	118%	1,341	2,336	174%

Tabla 4-9: Resumen de las fallas totales al año antes y después de la aplicación del factor de corrección en cada año con su respectivo porcentaje de aumento. Casos 3 y 4. Fuente: Autor

En la Tabla 4-9 se presenta la cantidad de fallas para los casos 3 y 4, antes y después de multiplicar por el factor de corrección *K* para cada año del periodo de estudio y su correspondiente porcentaje de aumento. Se observa que la cantidad de fallas aumenta cada año para cada caso, sin embargo, se observa leves caídas descritas principalmente en las fechas del año de realización del overhaul o el año posterior (celdas destacadas en amarillo). La diferencia que ocurre en las fechas de los Overhauls en ambos casos se explica principalmente por la calidad del Overhaul del Caso 4.

- **Caso 5: Caso HI=5,5**

Los resultados obtenidos incorporando el factor de corrección sobre la tasa de fallas de la ecuación N° 24 se observa en la siguiente figura:

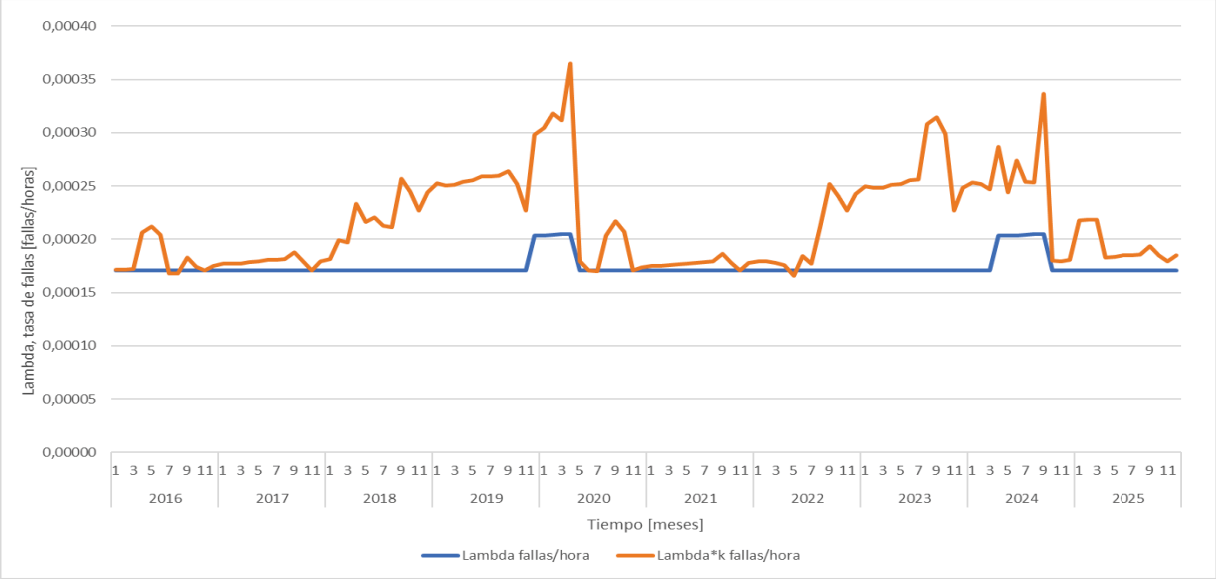

Figura 4-15: Gráfico de la Tasa de Fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 5. Fuente: Autor

En la Figura 4-15 se presenta la tasa de fallas en *[fallas/hora]* para el Caso 5. Acá se observa en la curva *Lambda* que la tasa de fallas es constante hasta que llega a las 30000 [horas] en donde el parámetro de forma (β) cambia a 1.1, y la tasa de fallas aumenta. Como se ha mencionado anteriormente, la curva *Lambda*K* se ve afectada por los modificadores lo que provoca el efecto de heterogeneidad en la forma de la curva y también, se logra evidenciar los momentos en los que se realiza los overhauls (a mediados del año 2020 y a final del año 2024).

- **Caso 6: HI=5,5 Overhaul Deficiente**

Los resultados obtenidos incorporando el factor de corrección sobre la tasa de fallas de la ecuación N° 24 se observa en la siguiente figura:

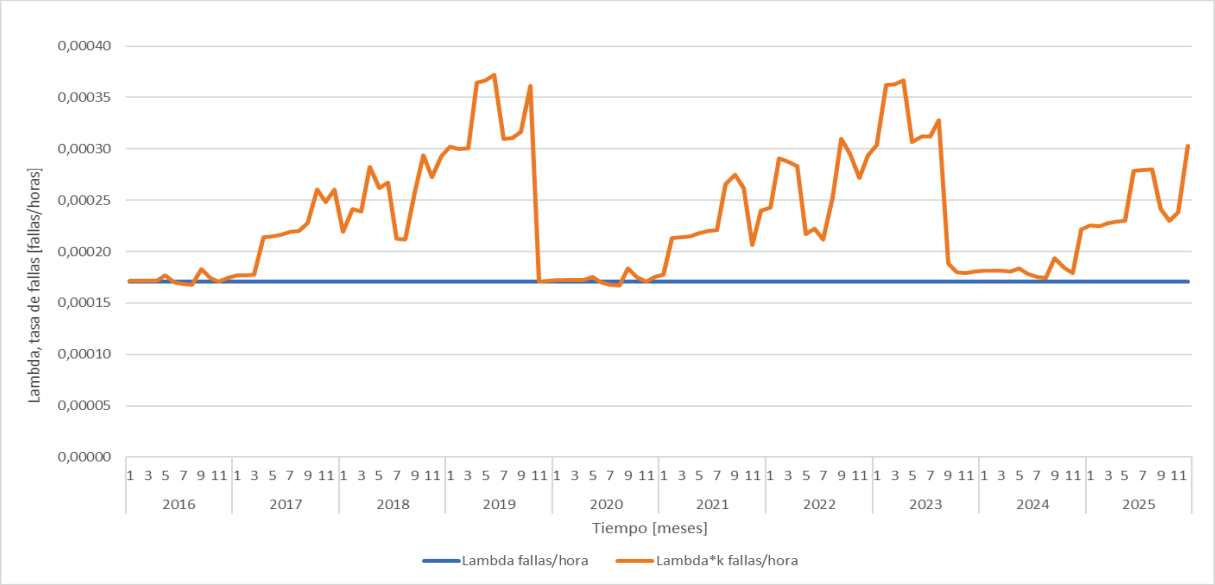

Figura 4-16: Gráfico de la Tasa de Fallas vs Tiempo de la Bomba para el Caso 6. Fuente: Autor

La figura 4-16 presenta la tasa de fallas *[fallas/hora]* para el Caso 6. Acá se observa que la curva Lambda se presenta constante a lo largo de todo el periodo de estudio, debiéndose únicamente a que el overhaul se realiza cuando la curva de *HIM* llega al valor de HI=5,5 antes de las 30000 horas de trabajo. Sin embargo, para la curva *Lambda*K* se observa el aumento de fallas en comparación con el Caso 5, esto se debe a la calidad del overhaul realizado, cuando el equipo se encuentra en peor condición los modificadores de salud aumentan su valor y así el valor del factor de corrección *K*, esta información se corrobora en la tabla 4-10.

En otras palabras, para la curva *Lambda*K* se observa una gran diferencia frente a la curva *Lambda*, esto se debe a dos efectos: el primero, es directamente el uso del factor *K* que viene de incorporar los modificadores de salud, confiabilidad y de carga; y segundo, es el uso de un overhaul más económico, esto implica en que la cantidad de fallas aumenta más prontamente que en el caso anterior llegando a valores mayores.

En la tabla 4-10 se presenta un resumen de la tasa de fallas para los casos 5 y 6, antes y después de multiplicar por el factor de corrección *K* para cada año del periodo de estudio y su correspondiente porcentaje de aumento.

Año	Caso 5: Caso HI=5,5			Caso 6: Caso HI=5,5 Overhaul Deficiente		
	Fallas totales al año	Fallas totales al año * K	Porcentaje de aumento [fallas/año]	Fallas totales al año	Fallas totales al año * K	Porcentaje de aumento [fallas/año]
2016	1,23	1,29	105%	1,23	1,24	101%
2017	1,34	1,40	105%	1,34	1,70	127%
2018	1,23	1,58	117%	1,23	1,67	135%
2019	1,36	2,00	148%	1,34	2,52	180%
2020	1,32	1,69	128%	1,23	1,24	101%
2021	1,34	1,39	103%	1,34	1,76	131%
2022	1,23	1,44	117%	1,23	1,90	154%
2023	1,34	2,05	153%	1,34	2,27	169%
2024	1,34	1,73	130%	1,23	1,32	107%
2025	1,34	1,51	113%	1,34	1,95	145%

Tabla 4-10: Resumen de las fallas totales al año antes y después de la aplicación del factor de corrección con su respectivo porcentaje de aumento. Casos 5 y 6. Fuente: Autor

En la Tabla 4-10 se presenta el resumen de la tasa de fallas al año para cada año de estudio, antes y después de aplicar el factor de corrección *K* para el Caso 5 y el Caso 6. Se observa que la cantidad totales de fallas del Caso 5 es 17 y para el Caso 6 es 18, esto se debe a que el Overhaul realizado es de baja calidad, lo que induce que los modificadores aumenten y así empeore la salud del equipo provocando que exista este aumento de fallas. Así mismo, el promedio del porcentaje de aumento de fallas para el Caso 5 es 122% versus el 135% del Caso 6, reflejando lo que se mencionaba anteriormente.

Se debe aclarar que las ecuaciones N° 14 y N° 24 *(Lambda* y *Lambda*K)*, tasa de fallas [fallas/hora] se multiplica por la cantidad de horas de trabajo al mes para obtener la cantidad de fallas al mes y luego se suman las fallas de cada mes en el periodo de un año y así obtener las fallas totales al año, se detalla en las ecuaciones N° 28.

4.4. Análisis de Costo de Ciclo de Vida

Para realizar el Análisis de Costo de Ciclo de Vida de la Bomba es necesario obtener unos datos iniciales que serán resumidos en las siguientes tablas:

Categoría	Costo (USD)
Inversión Inicial	$3.100.000
Costos de operación anual	$466.400
Costos de mantenimiento preventivo anual	$11.100
Costos por falla	$193
Costo de Overhaul	$30.000

Tabla 4-11: Resumen de costos. Fuente: Autor

Categoría	Valor
IPC	3%
Tasa de descuento	10%

Tabla 4-12: IPC y Tasa de descuento. Fuente: Autor

La tabla 4-11 presenta el valor de los costos para las categorías asociadas en el análisis de costo del ciclo de vida y la tabla 4-12 presenta el valor del reajuste del IPC y la tasa de descuento útil para la aplicación del VAN. El análisis de costo del ciclo de vida se realiza para los 6 casos mencionados con el método descrito en el Desarrollo del Modelo.

Como se había mencionado, la Bomba pertenece a un sistema de bombeo de agua de mar compuesto por 3 bombas adicionales, estas se hacen funcionar debido a las necesidades de demanda de gas. Por lo tanto, cuando las fallas ocurren a un equipo, estas no comprometen la continuidad operacional de la planta, por lo tanto, las fallas representadas en el estudio no serán asociadas a eventos en donde no se detenga la producción, por lo mismo, es que tienen un bajo impacto en el cálculo.

En primera instancia, se realiza un flujo de caja, en donde se consideran todos los costos asociados de la tabla 4-11, se realiza el correspondiente reajuste del IPC al valor de los costos de operación, mantenimiento preventivo anual, costos por fallas y costos de mantenimiento mayor o Overhaul.

Casos	Fallas	CTPF (USD)
Caso 1	18	$2.296
Caso 2	21	$2.739
Caso 3	15	$1.953
Caso 4	17	$2.236
Caso 5	16	$2.073
Caso 6	18	$2.387

Tabla 4-13: Resumen de los costos totales por falla en valor presente por cada caso de estudio. Fuente: Autor

En la tabla 4-13 se resumen los costos totales por falla en valor presente para cada caso de estudio. Los valores tienen directa relación con la cantidad de fallas, sin embargo, se pueden apreciar leves diferencias. En primera instancia, se observa que la cantidad de fallas del Caso 1 y 6 son iguales, sin embargo, en el costo hay leves diferencias que se explican por el periodo en el cual ocurrieron estas fallas. Por otra parte, al tomar como ejemplo la comparativa entre los Casos 1 y 2: en ambos casos el overhaul se realiza en las 40000 horas de trabajo, pero basta con efectuar un overhaul deficiente para que la cantidad de fallas aumenten y con ello, los costos totales por falla.

El Caso 4 presenta la menor cantidad de fallas y con el costo más bajo de los 6 casos, esto se debe a lo que se explicaba previamente: el overhaul se realiza antes que, para los otros casos, implicando directamente en la cantidad de fallas.

Los resultados del costo total del ciclo de vida en valor presente se exponen en la tabla 4-14. Se debe aclarar que todos los costos que siguen a continuación son presentados en USD.

Caso de Estudio	Cantidad de fallas totales	Cantidad de Overhauls	VAN (USD)
Caso 1	18	1	$6.409.516
Caso 2	21	1	$6.399.555
Caso 3	15	2	$6.428.549
Caso 4	17	3	$6.417.162
Caso 5	16	2	$6.426.149
Caso 6	18	2	$6.409.182

Tabla 4-14: Resumen de la Cantidad de fallas totales, Cantidad de Overhauls y Valor Actual Neto durante el periodo de trabajo para cada caso de estudio. Fuente: Autor

La Tabla 4-14 presenta la cantidad de fallas totales, la cantidad de Overhauls realizados y el costo total en valor presente para cada caso previamente expuesto. A modo de resumen se aprecia que para la comparación de cada caso con su homólogo de Overhaul Deficiente, la cantidad de fallas aumenta, sin embargo, el valor del VAN es menor, esto se debe principalmente a que el costo del Mantenimiento Mayor es de un 50% más bajo que para los casos en donde se realiza un Overhaul completo.

Al comparar el Caso 1 con el Caso 6, se observan la misma cantidad de fallas, con un aumento en la cantidad de overhaul, sin embargo, el costo asociado es levemente menor para el Caso 6, esto se explica debido a que un overhaul deficiente tiene menor costo que un overhaul completo. Lo mismo ocurre al comparar el Caso 3 con el Caso 4, en donde, si bien para el segundo caso tiene una falla adicional al Caso 3 y la cantidad de overhauls aumenta, el costo total asociado disminuye debido únicamente al costo del overhaul deficiente.

Ocurre una particularidad que es importante mencionar al comparar el Caso 3 con el Caso 5. Para ambos casos la cantidad de overhauls es la misma, sin embargo, la cantidad de fallas aumenta en este último, lo cual no se refleja en el valor del VAN. Esto se debe a que los Overhauls para el Caso 3 se realizan un año antes que, para el Caso 5 (como se observa en las figuras 4-7 y 4-9, respectivamente), y al traer esos valores al presente ocurre este efecto, a esto le afecta principalmente que el porcentaje de reajuste es menor que la tasa de descuento (3% vs 10%). (Las tablas completas del flujo de caja se presentan en la sección de Anexos).

En conclusión, para el análisis del costo de ciclo de vida el costo de mantenimiento mayor impacta en mayor medida que los costos por falla, debido a que su valor es mucho mayor, esto quiere decir, que una mayor cantidad de overhauls realizados en el periodo implicará un aumento en los costos totales en mayor medida si se compara con un aumento en la cantidad de fallas.

5. Validación y comparación con modelo tradicional de LCC

El Costo de Ciclo de Vida (LCC, por sus siglas en inglés) será realizado para los Casos 1 y 2 de estudio y para esto, se presentan dos tipos de análisis: modelo tradicional, presentado en el marco teórico y el método propuesto, en el cual se incorporan las temáticas de salud de activos, presentado en el desarrollo del modelo.

- **Análisis del Costo de Ciclo de Vida método tradicional (LCC MT):** Para este punto basta únicamente con obtener desde los parámetros de Weibull (**η y β**) el *MTTF*, el cual determinará la tasa de fallas para ese año y los siguientes, entregando una tasa de fallas constante a lo largo del periodo de estudio.
- **Análisis del Costo de Ciclo de Vida incorporando temáticas de la salud de activos (LCC AHI):** Como se había mencionado para este análisis se realiza según la función frecuencia de fallas de la distribución de Weibull ($\lambda(t)$). La ventaja que presenta esta metodología es que al ser una función que varía en el tiempo, va a entregar año tras año una variación de la tasa de fallas, más realista al incorporar el aspecto de la salud del activo e irá en aumento hasta la fecha del overhaul.
- Por otra parte, se realiza el Análisis del Costo de Ciclo de Vida contabilizando la cantidad de fallas antes de la aplicación del factor de corrección, esto se realiza con el fin de observar el efecto del factor *K* en la cantidad de fallas y a su vez en los costos.

En primera instancia, se presenta la tabla 5-1, la cual resume los Costos Totales por Falla para el Caso 1 y 2 incorporando la salud de activos y con el método tradicional para cada año del periodo. En la sección Anexos se presentan en detalle los flujos de caja para cada caso presentado.

Caso de Estudio	Cantidad de Overhauls	Cantidad de fallas totales		VAN (USD)	
		LCC MT	LCC AHI	LCC MT	LCC AHI
Caso 1	1	15	18	$6.409.201	$6.409.516
Caso 2	1	15	21	$6.398.797	$6.399.555

Tabla 5-1: Resumen de la Cantidad de Overhauls, Cantidad de fallas totales y el Costo Total en valor presente para el método tradicional y el método propuesto para los Casos 1 y 2. Fuente: Autor.

La tabla 5-1 presenta la cantidad de overhauls realizados en el periodo de trabajo, la cantidad de fallas y el costo total aplicando el método tradicional y el método en el que incorpora la salud de los activos para los Casos 1 y 2. Al comparar los métodos expuestos se observa que la cantidad de fallas aumenta en ambos casos, esto se explica a que el método tradicional contabiliza las fallas constantes año a año, mientras que para el método propuesto en el que incorpora los modificadores de salud, confiabilidad y carga existirán variaciones debido al estado o condición en el que se encuentre el activo en el momento del análisis y así también la cantidad de fallas. Por otra parte, como se había mencionado anteriormente, lo que más afecta en el análisis es el costo del overhaul, debido a que es mucho mayor que el costo por fallas.

Otro análisis que es relevante considerar es el efecto del factor de corrección *K* sobre la cantidad de fallas y a su vez sobre los costos. A continuación, se presentan dos figuras en las que se muestra más gráficamente el efecto:

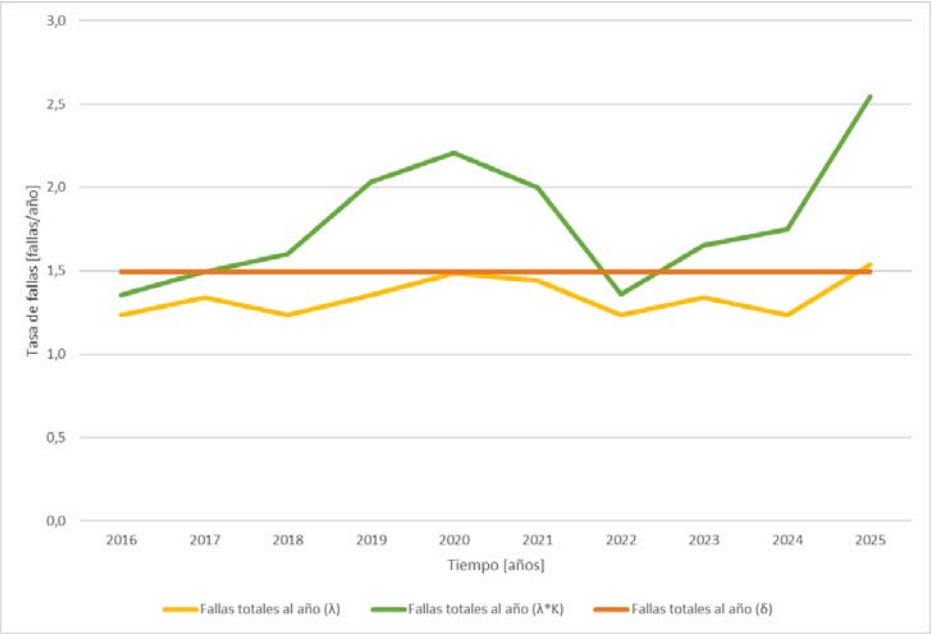

Figura 5-1: Gráfico de la cantidad de fallas al año antes y después de la aplicación del factor de corrección K y según el método tradicional. Ccaso 1. Fuente: Autor

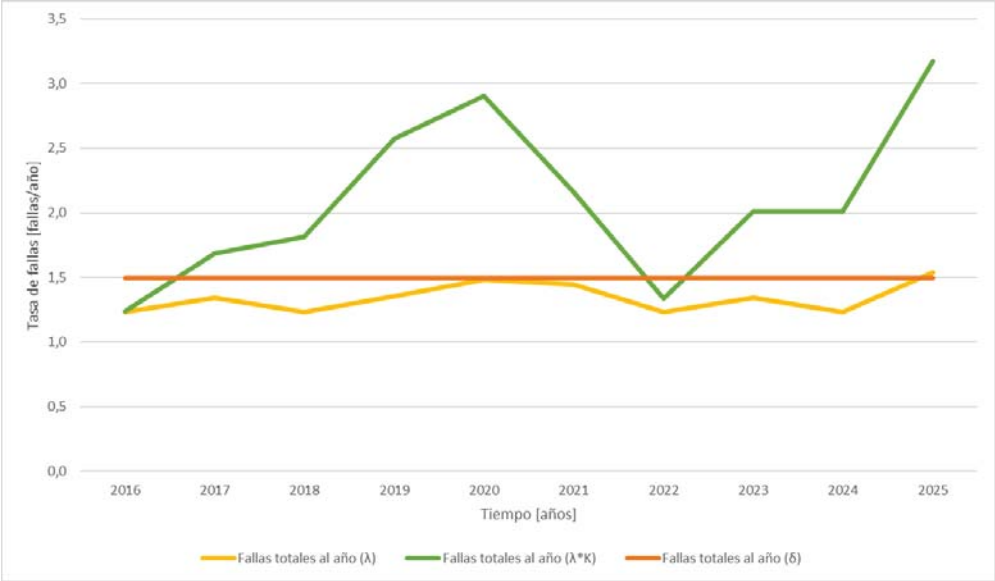

Figura 5-2: Gráfico de la cantidad de falla al año antes y después de la aplicación del factor de corrección K y según el método tradicional. Caso 2. Fuente: Autor

Las figuras 5-1 y 5-2 presentan la cantidad de fallas bajo la aplicación de los métodos expuestos para los Casos 1 y 2, respectivamente. Se observa que la cantidad de fallas antes de la aplicación del factor *K* no se ve alterada mayormente, esto es debido a que el parámetro de forma (β) es constante y de valor igual a 1 hasta las 30000 [horas] de trabajo, mientras que la cantidad de fallas posterior a la aplicación del factor de corrección va en evidente aumento, esto se debe al efecto directo que tienen los modificadores de salud y confiabilidad en el Índice de Salud Modificado encerrados en el factor de corrección *K*, permitiendo entregar un estado del equipo en el momento de la medición y así reflejarlo en la tasa de fallas. Al comparar las figuras 5-1 y 5-2 se observa que en esta última se acentúa en mayor medida la diferencia entre estas dos tasas, y se debe directamente a la calidad del overhaul realizado en el Caso 2, éste provoca que la salud del equipo se vea empeorada más prontamente que en el Caso 1, lo que provoca que existan mayores diferencias entre las barras.

Por otra parte, se observa que la cantidad de fallas según el método tradicional (δ) es constante a lo largo de los años, mientras que para el Caso en donde ya se multiplica por el factor de corrección *K* la cantidad de fallas va en aumento. La mayor diferencia se acentúa en las fechas cercanas al overhaul, acá los modificadores aumentan de valor debido al estado o condición del equipo provocando que la cantidad de fallas vayan aumentando con el paso del tiempo.

Ésta es la principal limitante del método tradicional, debido a que no expresa representatividad en el estado del equipo, mientras que cuando se contabilizan las fallas según la distribución de Weibull va a permitir observar un evidente aumento año a año.

A continuación, se expone una tabla resumen con los costos totales por fallas de los métodos expuestos anteriormente.

	Método de trabajo	Caso de Estudio	
		Caso 1	Caso 2
Cantidad de fallas totales	δ	15	15
	λ	13	13
	λ*K	18	21
Costos totales por fallas (USD)	δ	$1.987	$1.987
	λ	$1.426	$1.426
	λ*K	$2.296	$2.739

Tabla 5-2: Resumen de la cantidad de fallas y los costos totales por fallas en valor presente para el método antes y después de la aplicación del factor K y método tradicional. Casos 1 y 2. Fuente: Autor.

En la tabla 5-2 se presentan un resumen de lo anteriormente presentado: la cantidad de fallas para el método antes y después de la aplicación del factor de corrección K y para el método tradicional, en conjunto con sus respectivos costos totales por fallas asociados. Se observa que no existe un aumento en la cantidad de fallas para la tasa de fallas (λ) al comparar los Casos 1 y 2, esto se debe a que para ambos casos la curva de *Lambda* (o curva de comportamiento teórico) se ve afectada únicamente por los parámetros de forma y escala, mientras que para la tasa de fallas ($\lambda*K$) se ve afectada por el efecto de los modificadores de salud y confiabilidad lo que provoca que varíen entre casos debido al efecto que tiene la calidad del overhaul. Por otra parte, se observa una directa relación para la cantidad de fallas y los costos.

Es importante mencionar que el efecto del factor de corrección K si tendrá efectos en los costos debido a que este lleva consigo las implicancias de los modificadores sobre la salud de la bomba y esto afectará la tasa de fallas. Finalmente, para todos los métodos presentados, el análisis del costo del ciclo de vida de la bomba se verá más afectado por el valor del costo de mantenimiento mayor o overhaul que por la cantidad de fallas, debido a que es mucho mayor el costo del overhaul que el costo por fallas.

6. Conclusiones

Los objetivos propuestos fueron cumplidos a través del diseño de la metodología expuesta en donde se incorpora el análisis del índice de salud de activos a la tasa de fallas de la Distribución de Weibull, en donde se cuantifica el deterioro del equipo de estudio. Por otra parte, el propio Análisis de los Costos a lo largo del Ciclo de Vida de un activo va a entregar información relevante para la toma de decisiones, sin embargo, al añadir las temáticas de salud de activos, el proceso se vuelve con más detalle, entregando aún más información.

Los resultados para el caso de estudio entregan que el costo por fallas tiene menor impacto que la cantidad y calidad de overhauls realizados en el equipo. Esto implica que si lo que se busca es abaratar costos retrasando la fecha del overhaul, esto traerá consecuencias en la salud de la bomba debido a la cantidad de fallas que tendrá en el periodo, las cuales tendrán un impacto en el funcionamiento de la planta. Sin embargo, una inversión en tecnología podrá cuantificar un ahorro futuro en mejores índices de salud de los equipos.

La incorporación del factor K permite agregar cualquier efecto de cambio en las condiciones de uso, en los modificadores, por sobre de los considerados en el modelo de riesgo y confiabilidad a la tasa de fallas en el tiempo. Este carácter dinámico, además, refleja el efecto de cualquier tipo de mantenimiento mayor en la propia tasa de fallas, dándole un mayor realismo a los modelos de costeo de ciclo de vida.

Como se mencionaba anteriormente, la metodología entrega la información y herramientas para la toma de decisiones en la empresa con respecto al activo de estudio. El postponer o adelantar una actividad de mantenimiento preventivo o predecir la ocurrencia de algunas fallas son algunas de las decisiones a las que tiene alcance la metodología propuesta

A modo de comparación con el método tradicional, se observa que, para este último caso, al tener una tasa de fallas constante a lo largo del periodo de estudio a través del MTTF, el método entregará inexactitudes en la información, ignorando aspectos que son relevantes dentro del análisis como, por ejemplo, la misma tasa de fallas o la calidad de los Overhauls realizados. Por lo mismo, la metodología propuesta representa un avance en el estudio de la

confiabilidad en la búsqueda de disminuir el desconocimiento y la incertidumbre a la hora de tomar decisiones.

Es importante mencionar que esta metodología tiene la principal característica de poder adaptarse a otros equipos de estudio, es decir, de ser sensible a eventuales cambios o a distintos activos, sin embargo, no es una respuesta única al problema presentado, ya que es posible considerar mayores exigencias técnicas dentro del método que permita más exactitud en los valores. Es decir, para el método existe la posibilidad de mejora, incorporando nuevos modificadores o simplemente encontrando una relación entre el índice de salud inicial y el índice de salud modificado en la que sea de mayor representatividad. De todas maneras, es una buena aproximación que permite disminuir el nivel de incertidumbre para el proceso de evaluación de costos.

7. Glosario

Confiabilidad: Probabilidad de que un equipo opere sin falla en las condiciones establecidas por un tiempo determinado.

HI: Índice de Salud

AHI: Índice de Salud de Activos (Asset Health Index)

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 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

$HI_{nuevo}=0,5$*:* 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.

HIi: Índice de Salud Inicial

t: edad actual del activo

HIM: Índice de salud actual modificado

M_C*:* Modificador de carga

M_S*:* Modificador de salud del activo (según condición y operación)

M_F*:* Modificador de confiabilidad

TTF: Tiempo entre fallas

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

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

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

$\lambda(x)$*:* Función frecuencia de falla

E(x) = MTBF=MTTF: La media (esperanza matemática) o tiempo medio entre fallas.

η*:* Parámetro de escala o vida característica [tiempo/fallas]

β*:* Parámetro de forma [-]

Γ*:* Función Gamma

ACCV: Análisis del Costo de Ciclo de Vida

CAPEX: Costos de capital

OPEX: Costos de operación

CI: Costo inicial de adquisición e instalación

CO: Costos operacionales

CMP: Costos de mantenimiento preventivo

CTPF: Costos totales por falla

CMM: Costos de mantenimiento mayor o Overhaul

VR: Valor residual del activo al alcanzar el final de la vida útil

IPC: Índice de Precios al Consumo

VAN: Valor Actual Neto

δ_f*:* Frecuencia de fallas

K(t): Factor de corrección de la salud

λ_i*:* Tasa de fallas antes de la correción

λ_f: Tasa de fallas corregida con el factor $K(t)$

t_i: Cantidad de horas de trabajo durante el periodo i

C_f: Costos por cada falla

GN: Gas Natural

GNL: Gas Natural Licuado

ORV: Vaporizadores de Panel Abierto (Open Rack Vaporizer)

8. Bibliografía

Adolfo Arata, A. A. (2013). *Ingeniería de la Confiabilidad.* Santiago.

Crespo, A. (2019). *A model for Lifecycle cost calculation based on asset health index.* Madrid, España.

Crespo, A. (2019). *MGM Gas.* Madrid, España.

Crespo, C. P. (2017). *Análisis de Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad. Definición de intervalos de Mantenimiento preventivo.* Sevilla: Ingeman.

DNO Common Network Asset Indices Methodology. (2017).

ISO14224. (1999). *Recolección e intercambio de información de confiabilidad y mantenimiento para el equipo.*

ISO15686. (2017). *ISO 15686 - Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 5: Life-cycle costing.*

ISO55000. (2014). *Gestión de activos - Aspectos generales, principios y terminología.*

Manual de funcionamiento y mantenimiento bomba aspirante de agua de mar. (2009).

Parra, C. (2005). *Investigación Doctoral: 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). *Curso: Técnicas de Análisis de Costo de Ciclo de Vida e Ingeniería de Confiabilidad aplicadas en el proceso de optimización del mantenimiento.*

Salazar, R. R. (2004). *Aplicaciones de la Distribución de Weibull en ingeniería de confiabilidad.*

Senthil Kumaran Durairaj, S. O. (2002). *Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies.*

UNE-EN13306:2018. (2018). *Mantenimiento, Terminología del mantenimiento.*

Woodhouse, D. (1997). *Life Cycle Costing - Theory, information acquisition and application.*

9. Anexos

9.1. Tablas de Costos Totales

Para la ejecución de los cálculos desarrollados en el Análisis del Costo de Ciclo de Vida se diseñaron las tablas de flujo de caja expuestas a continuación, para cada caso de estudio:

- Caso 1: Caso Teórico

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos por Distribución de Weibull	Equipo		400-P-101A			Inversión	3,1 MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,1
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$30.000	MTTF		5856,13	5650,65
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,50	1,55
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		289	297	306	315	325	335	345	355	366	377
CMM		0	0	0	0	0	35.822	0	0	0	0
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.789**	**492.122**	**506.886**	**522.093**	**537.755**	**589.710**	**570.505**	**587.620**	**605.248**	**623.406**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.789**	**492.122**	**506.886**	**522.093**	**537.755**	**589.710**	**570.505**	**587.620**	**605.248**	**623.406**
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		477.790	492.123	506.887	522.094	537.756	589.711	570.506	587.621	605.249	623.407
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.790	492.123	506.887	522.094	537.756	589.711	570.506	587.621	605.249	623.407
				IPC	0,03	tasa de descuento	0,1	VAN		USD 6.409.201	

Tabla 9-2: ACCV con Método tradicional. Caso 1. Fuente: Autor

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos incorporando aspectos de Salud de Activos	Equipo		400-P-101A			Inversión	3,1 MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,1
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$30.000	MTTF		5856,13	5650,652974
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,495868432	1,550263313
	λ_f	1	1	2	2	2	2	1	2	2	3
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		193	199	410	422	434	447	230	475	489	755
CMM							35.822				
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.694**	**492.025**	**506.990**	**522.200**	**537.866**	**589.823**	**570.391**	**587.741**	**605.373**	**623.786**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.694**	**492.025**	**506.990**	**522.200**	**537.866**	**589.823**	**570.391**	**587.741**	**605.373**	**623.786**
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		477.695	492.026	506.991	522.201	537.867	589.824	570.392	587.742	605.374	623.787
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.695	492.026	506.991	522.201	537.867	589.824	570.392	587.742	605.374	623.787
				IPC	0,03	tasa de descuento	0,1	VAN		USD 6.409.516	

Tabla 9-1: ACCV con Método propuesto. Caso 1. Fuente: Autor

- Caso 2: Caso Teórico con Overhaul Deficiente

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos por Distribución de Weibull											
	Equipo		400-P-101A			Inversión	3,1 MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,98
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$15.000	MTTF		5856,13	5190,878421
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,495868432	1,687575645
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		289	297	306	315	325	335	345	355	366	377
CMM		0	0	0	0	0	17.389	0	0	0	0
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.789**	**492.122**	**506.886**	**522.093**	**537.755**	**571.277**	**570.505**	**587.620**	**605.248**	**623.406**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.789**	**492.122**	**506.886**	**522.093**	**537.755**	**571.277**	**570.505**	**587.620**	**605.248**	**623.406**
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		477.790	492.123	506.887	522.094	537.756	571.278	570.506	587.621	605.249	623.407
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.790	492.123	506.887	522.094	537.756	571.278	570.506	587.621	605.249	623.407
				IPC	**0,03**	**tasa de descuento**	**0,1**	**VAN**		**USD 6.398.797**	

Tabla 9-3: ACCV con Método tradicional. Caso 2. Fuente: Autor

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos incorporando aspectos de Salud de Activos											
	Equipo		400-P-101A			Inversión	3,1 MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,1
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$15.000	MTTF		5856,13	5650,652974
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,495868432	1,550263313
	λ_f	1	2	2	3	3	2	1	2	2	3
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		193	398	410	633	652	447	230	475	489	755
CMM							17.389				
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.694**	**492.224**	**506.990**	**522.411**	**538.083**	**571.391**	**570.391**	**587.741**	**605.373**	**623.786**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.694**	**492.224**	**506.990**	**522.411**	**538.083**	**571.391**	**570.391**	**587.741**	**605.373**	**623.786**
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		477.695	492.225	506.991	522.412	538.084	571.392	570.392	587.742	605.374	623.787
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.695	492.225	506.991	522.412	538.084	571.392	570.392	587.742	605.374	623.787
				IPC	**0,03**	**tasa de descuento**	**0,1**	**VAN**		**USD 6.399.555**	

Tabla 9-4: ACCV con Método propuesto. Caso 2. Fuente: Autor

- Caso 3: Caso HI=4

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos incorporando aspectos de Salud de Activos	Equipo		400-P-101A			Inversión	3,1 MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,98
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$30.000	MTTF		5856,13	5190,878421
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,495868432	1,687575645
	λ_f	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		193	199	410	422	217	224	461	475	244	504
CMM					32.782				36.896		
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.693**	**492.024**	**506.989**	**554.981**	**537.648**	**553.777**	**570.621**	**624.636**	**605.127**	**623.533**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.693**	**492.024**	**506.989**	**554.981**	**537.648**	**553.777**	**570.621**	**624.636**	**605.127**	**623.533**
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		477.694	492.025	506.990	554.982	537.649	553.778	570.622	624.637	605.128	623.534
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.694	492.025	506.990	554.982	537.649	553.778	570.622	624.637	605.128	623.534
				IPC	0,03	tasa de descuento	0,1	VAN		USD 6.428.549	

Tabla 9-5: ACCV con Método propuesto. Caso 3. Fuente: Autor

- Caso 4: Caso HI=4 con Overhaul Deficiente

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos incorporando aspectos de Salud de Activos	Equipo		400-P-101A			Inversión	3,1 MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,98
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$15.000	MTTF		5856,13	5190,878421
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,495868432	1,687575645
	λ_f	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		193	398	410	422	217	447	461	237	489	504
CMM					16.391			17.911			19.572
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.693**	**492.223**	**506.989**	**538.590**	**537.648**	**554.001**	**588.532**	**587.502**	**605.372**	**643.104**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.693**	**492.223**	**506.989**	**538.590**	**537.648**	**554.001**	**588.532**	**587.502**	**605.372**	**643.104**
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		477.694	492.224	506.990	538.591	537.649	554.002	588.533	587.503	605.373	643.105
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.694	492.224	506.990	538.591	537.649	554.002	588.533	587.503	605.373	643.105
				IPC	0,03	tasa de descuento	0,1	VAN		USD 6.417.162	

Tabla 9-6: ACCV con Método propuesto. Caso 4. Fuente: Autor

- Caso 5: Caso HI=5,5

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos incorporando aspectos de Salud de Activos	Equipo		400-P-101A			Inversión	14,5MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,1
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$30.000	MTTF		5856,13	5650,65
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,50	1,55
	λ_f	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		193	199	410	422	434	224	230	475	489	504
CMM						33.765				38.003	
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.693**	**492.024**	**506.989**	**522.199**	**571.630**	**553.777**	**570.390**	**587.740**	**643.375**	**623.533**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.693**	**492.024**	**506.989**	**522.199**	**571.630**	**553.777**	**570.390**	**587.740**	**643.375**	**623.533**
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		477.694	492.025	506.990	522.200	571.631	553.778	570.391	587.741	643.376	623.534
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.694	492.025	506.990	522.200	571.631	553.778	570.391	587.741	643.376	623.534
				IPC	**0,03**	**tasa de descuento**	**0,1**	**VAN**		**USD 6.426.149**	

Tabla 9-7: ACCV con Método propuesto. Caso 5. Fuente: Autor

- Caso 6: Caso HI=5,5 con Overhaul Deficiente

Flujo de Caja utilizando un modelo de tasa de fallos incorporando aspectos de Salud de Activos	Equipo		400-P-101A			Inversión	14,5MUSD	Rango (horas)		0-30000	>30000
	Descripcion		SWP			CO	$466.400	α		5856,13	5856,13
	Ubicación		GNL Quintero			CMP	$11.100	β		1	1,1
	Vida normal estimada		40000 Horas			CMM	$15.000	MTTF		5856,13	5650,65
	Criterio de Overhaul		40000 Horas			Costo Falla	$193	δ		1,50	1,55
	λ_f	1	2	2	3	1	2	2	2	1	2
Año	0	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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		466.400	480.392	494.804	509.648	524.937	540.685	556.906	573.613	590.822	608.546
CMP		11.100	11.433	11.776	12.129	12.493	12.868	13.254	13.652	14.061	14.483
Costo por falla		193	398	410	633	217	447	461	475	244	504
CMM					16.391				18.448		
Depreciacion Legal		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UAI		**477.693**	**492.223**	**506.989**	**538.801**	**537.648**	**554.001**	**570.621**	**606.188**	**605.127**	**623.533**
Imp 1ra Categoría		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UDI		**477.693**	**492.223**	**506.989**	**538.801**	**537.648**	**554.001**	**570.621**	**606.188**	**605.127**	**623.533**
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		477.694	492.224	506.990	538.802	537.649	554.002	570.622	606.189	605.128	623.534
Inversion Fija	3.100.000										
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversion											
Amortizacion		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Capitales	3.100.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo de Caja	3.100.000	477.694	492.224	506.990	538.802	537.649	554.002	570.622	606.189	605.128	623.534
				IPC	**0,03**	**tasa de descuento**	**0,1**	**VAN**		**USD 6.409.182**	

Tabla 9-8: ACCV con Método propuesto. Caso 6. Fuente: Autor

9.2. Diagrama del procedimiento de la metodología propuesta

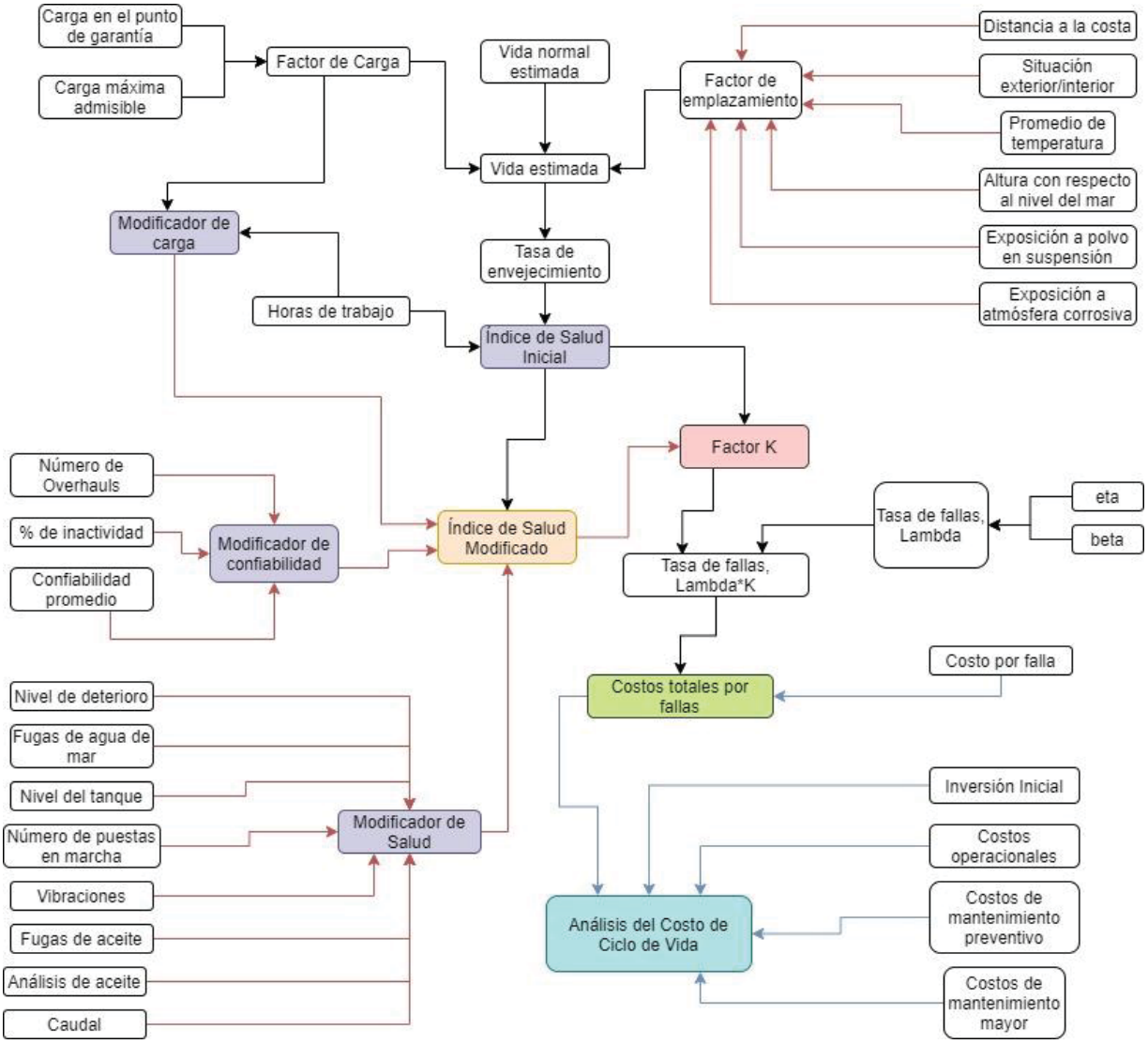

Figura 9-1: Diagrama del procedimiento del Cálculo del Análisis del Costo del Ciclo de Vida incorporando la Salud de Activos.