

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Diseño y aplicación de un modelo de cálculo de Costes de Ciclo de Vida de un activo basado en su Índice de Salud.

Autor: Enrique Paloma Castro

Tutor: Adolfo Crespo Márquez

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2021



Diseño y aplicación de un modelo de cálculo de Costes de Ciclo de Vida de un activo basado en su Índice de Salud.

Autor:

Enrique Paloma Castro

Tutor:

Adolfo Crespo Márquez

Catedrático

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Diseño y aplicación de un modelo de cálculo de Costes de Ciclo de Vida de un activo basado en su Índice de Salud.

Autor: Enrique Paloma Castro

Tutor: Adolfo Crespo Márquez

El tribunal nombrado para juzgar el TFM arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

Me siento enormemente agradecido a la vida por haber puesto en mi camino a personas, todas ellas, buenas de corazón. Gracias por ese tiempo compartido, por esas experiencias vividas con todas y cada una de ellas. Todas han influido en mí positivamente y han contribuido a formar la persona y el profesional que hoy soy.

Al profesor Adolfo Crespo Márquez, agradecer su amor y pasión por la investigación. Gracias por sus consejos, apoyo e implicación que han hecho que la realización de este trabajo sea factible.

A todos los miembros del grupo de investigación, Sistemas Inteligentes de Mantenimiento, por ser ejemplos de esfuerzo, dedicación y del trabajo bien hecho. Pero sobre todo, gracias por vuestro lado humano que me ha hecho sentirme acogido en este grupo.

A todos los miembros de mi familia de los que me siento verdaderamente orgulloso y siento verdadera admiración.

A mis padres, Enrique y M^aPaz, por su amor y ternura, por sus ejemplos de vida sencilla, coherente y comprometida. Gracias por enseñarme a disfrutar de las pequeñas cosas que nos regala la vida. Por transmitirme el valor del compromiso, del inconformismo por las injusticias, de la defensa de la dignidad y de la valentía por luchar por un mundo nuevo. Gracias por el regalo de la fe.

A mis hermanas, Olga y Virginia, a las que adoro, por sus muestras constantes de cariño, por tener siempre las palabras adecuadas y estar cuando se les necesita. Gracias por ser ejemplos de mujeres trabajadoras y comprometidas con esta sociedad.

A mis sobrinas, por ser generadoras de felicidad aún sin saberlo, por despertar en mí infinidad de sentimientos nuevos.

Resumen

El objeto del presente trabajo es definir una estrategia de mantenimientos mayores a largo plazo para activos de alta capitalización, que permita mantener los niveles de fiabilidad de los activos dentro un rango controlado y reduzca en lo máximo posible el coste total (TOTEX) de ciclo de vida, asociado a esta estrategia. Para ello, en este trabajo se desarrolla un modelo, el cuál aglutina diversas metodologías disponibles en la literatura [1]-[3].

En primer lugar, mediante una metodología de “Análisis de Criticidad” (AC) [1] se prioriza los activos en base a la importancia de la función desempeñada por los mismos para que la organización cumpla y alcance sus objetivos, de manera que se focalice la toma de decisiones sobre aquellos activos más críticos para la organización. Posteriormente, a través de una metodología de “Índice de Salud de Activos” (AHI) [2], se calcula la condición actual y futura del estado general de los equipos, con la finalidad de estimar sus probabilidades de fallo durante todo su ciclo de vida. Por último, mediante una metodología de “Análisis de Coste de Ciclo de Vida” (ACCV) [3] y utilizando las tasas de fallos estimadas, se calcula el perfil de gastos asociado a la estrategia de mantenimiento evaluada, utilizando el enfoque TOTEX. De esta manera, mediante un proceso iterativo se podrán plantear diferentes estrategias de mantenimiento, calcular su perfil de gastos asociado y hallar aquella que garantice el menor gasto total (TOTEX) y los mayores niveles de fiabilidad de los equipos.

Para ilustrar el modelo propuesto, este es aplicado a 49 equipos de una terminal de recepción, almacenamiento y regasificación de Gas Natural Licuado (GNL) situada en una zona costera cuyo ambiente es especialmente agresivo. Tras realizar el análisis de criticidad, 15 equipos son clasificados como críticos. Para poder aplicar la metodología AHI, es necesario disponer de cierta información sobre la condición y funcionamiento de los activos evaluados. Al no disponer la empresa de la gran mayoría de estos datos para los activos críticos, se decide analizar un grupo motobomba de baja presión. Este activo esta clasificado con baja criticidad sin embargo, se dispone de la información necesaria para poder definir los diferentes parámetros utilizados en dicha metodología. De manera que con la finalidad de enriquecer el caso de estudio, este es el equipo seleccionado sobre el que se analizan las diferentes estrategias de mantenimientos mayores.

Se concluye que, mediante este modelo, se dispone de una herramienta objetiva para priorizar las intervenciones y tomar decisiones relacionadas con el control de fallos que maximicen la rentabilidad y minimicen los riesgos operacionales (fiabilidad y disponibilidad) y financieros (relacionados con el coste de ciclo de vida) de la organización.

Abstract

This work aims to define a long-term major maintenance strategy for high capitalization assets, which allows the reliability levels of the assets to be maintained within a controlled range and reduces the total life cycle cost (TOTEX) associated with this strategy as much as possible. To this end, this paper develops a model that brings together various methodologies available in the literature [1]-[3].

Firstly, by means of a "Criticality Analysis" (CA) methodology [1], the assets are prioritized based on the importance of the function performed by them for the organization to fulfill and achieve its objectives so as to focus decision-making on those assets that are most critical for the organization. Subsequently, through an "Asset Health Index" (AHI) methodology [2], the current and future condition of the general state of the equipment is calculated, to estimate their probability of failure throughout their life cycle. Finally, using a "Life Cycle Cost Analysis" (LCA) methodology [3] and using the estimated failure rates, the cost profile associated with the evaluated maintenance strategy is calculated using the TOTEX approach. In this way, through an iterative process, different maintenance strategies can be proposed. Then their associated cost profile can be calculated, and the one that guarantees the lowest total expenditure (TOTEX) and the highest levels of equipment reliability can be found.

The proposed model is applied to 49 pieces of equipment at Liquefied Natural Gas reception, storage, and regasification terminal located in a coastal area with a particularly aggressive environment in order to illustrate it. After performing the criticality analysis, 15 pieces of equipment are classified as critical. In order to be able to apply the AHI methodology, it is necessary to have certain information on the condition and operation of the assets being assessed. As the company does not have most of this information for critical assets, it was decided to analyze a low-pressure motor pump unit. This asset is classified as low criticality. However, the necessary information is available to be able to define the different parameters used in this methodology. In order to enrich the case study, this is the equipment selected to calculate the best major maintenance strategy.

It is concluded that, through this model, an objective tool is available to prioritize interventions and make decisions related to failure control that maximize profitability and minimize operational (reliability and availability) and financial (related to life cycle cost) risks for the organization.

Índice

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Índice	XIII
Índice de Tablas	XV
Índice de Figuras	XVII
1 Introducción	1
1.1 <i>Motivación</i>	1
1.2 <i>Coste de ciclo de vida del activo</i>	1
1.3 <i>Impacto de la fiabilidad en el coste de ciclo de vida</i>	3
1.4 <i>Objetivo</i>	3
1.5 <i>Sumario</i>	4
2 Estado del arte	5
2.1 <i>Análisis del Coste de Ciclo de Vida (ACCV)</i>	5
2.1.1 <i>Modelo de Tasa de Fallos Constante (Modelo de Woodward)</i>	5
2.1.2 <i>Modelo de Tasa de Fallos Determinista</i>	7
2.1.3 <i>Modelo de Tasas de Fallos por Distribución de Weibull</i>	8
2.2 <i>Índice de Salud de Activo (AHI)</i>	10
2.2.1 <i>Modelo Kinetrics</i>	11
2.2.2 <i>Modelo de cálculo del índice de salud de activos por DNV GL.</i>	12
2.2.3 <i>Modelo de cálculo del índice de salud de activos por TERNA.</i>	14
2.2.4 <i>Metodología de índices de activos de red comunes DNO del Reino Unido</i>	15
3 Descripción del modelo	19
3.1 <i>Datos requeridos</i>	21
3.2 <i>Análisis de Criticidad</i>	21
3.3 <i>Metodología de Índice de Salud de Activos</i>	23
3.3.1 <i>Índice de salud del activo hasta el momento del análisis (PHIt)</i>	23
3.3.2 <i>Proyección del índice de salud del activo (FHIIt)</i>	28
3.3.3 <i>Estimación de la tasas de fallos</i>	30
3.4 <i>Análisis del Coste de Ciclo de Vida</i>	31
3.5 <i>Análisis de estrategias</i>	34
3.6 <i>Comparativa de estrategias</i>	35
4 Casos de estudio	39
4.1 <i>Análisis de Criticidad</i>	40
4.2 <i>Metodología de Índice de Salud de Activos</i>	42
4.2.1 <i>Índice de Salud del activo hasta el momento de análisis (2013-2017)</i>	42
4.2.2 <i>Proyección del índice de salud del activo (2018-2035)</i>	51
4.2.3 <i>Estimación de las tasas de fallos (2018-2035)</i>	52
4.3 <i>Análisis de Coste de Ciclo de Vida (2013-2035)</i>	53
4.4 <i>Analisis de estrategias</i>	53

4.5	<i>Comparativa de estrategias</i>	54
5	Conclusiones	59
5.1	<i>Conclusiones técnicas del trabajo.</i>	59
5.2	<i>Experiencias personales durante la elaboración del trabajo</i>	59
5.3	<i>Líneas futuras de investigación</i>	60
	Referencias	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelo Kinetrics. Recomendaciones de mantenimiento en función del rango de salud.	12
Tabla 2. Modelo Terna. Rangos de HI.	15
Tabla 3. Criterio clasificación HI.	16
Tabla 4. ACCV simplificado del ejemplo genérico. Estrategia 1.	34
Tabla 5. ACCV simplificado del ejemplo genérico. Estrategia 2.	35
Tabla 6. Datos fiabilidad y costes de un activo genérico.	36
Tabla 7. Costes financieros por estrategia.	36
Tabla 8. Datos principales del grupo motobomba de baja presión	39
Tabla 9. Escala para los niveles del factor frecuencia de fallo	40
Tabla 10. Criterios y sus valores para el factor distancia a la costa.	43
Tabla 11. Criterios y sus valores para el factor altitud sobre el nivel del mar.	44
Tabla 12. Criterios y sus valores para el factor media anual de temperatura exterior.	44
Tabla 13. Criterios y sus valores para el factor exposición a agentes atmosféricos corrosivos.	44
Tabla 14. MS Caudal. Escenarios y valores asignados.	46
Tabla 15. MS Caudal. Trimestre 3 del 2016.	46
Tabla 16. MS Consumo eléctrico sobre la potencia nominal. Escenarios y valores asignados.	46
Tabla 17. MS Consumo eléctrico sobre la potencia nominal. Trimestre 3 del año 2016.	47
Tabla 18. MS Temperatura de aspiración. Escenarios y valores asignados.	47
Tabla 19. MS Temperatura de aspiración. Trimestre 3 del 2016.	47
Tabla 20. MS Vibraciones. Escenarios y valores asignados.	48
Tabla 21. MS Vibraciones. Trimestre 3 del año 2016.	48
Tabla 22. MS N° arranques. Escenarios y valores asignados.	48
Tabla 23. MS N° Arranques. Trimestre 3 del año 2016.	48
Tabla 24. Modificador de salud del equipo. Caso de estudio.	49
Tabla 25. MF Inactividad. Escenarios y valores asignados.	49
Tabla 26. MF Inactividad. Trimestre 3 del año 2016.	49
Tabla 27. MF N° Grandes Mtto. Escenarios y valores asignados.	49
Tabla 28. MF N° Grandes Mtto. Trimestre 3 del 2016.	50
Tabla 29. Modificador de fiabilidad del activo.	50
Tabla 30. Bloque condición. Trimestre 3 del 2016.	50
Tabla 31. Índice de Salud del activo hasta el análisis (2013-2017). Resultados bloques.	50
Tabla 32. PHI por año del caso de estudio (2013-2017).	52
Tabla 33. FHI de seis periodos para $\beta_c = 0.48$.	52
Tabla 34. Tasas de fallos actualizadas de Mf1 y Mf2 considerando estrategia 1.	53

Tabla 35. Tipos de coste y sus valores para el caso de estudio.	53
Tabla 36. Comparativa costes financieros estrategia 1 y 2.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de costes en el Ciclo de Vida de un activo.	2
Figura 2. Modelo Kinetrics. Probabilidad de fallo vs Índice de Salud	11
Figura 3. Modelo DNV. Diagrama de flujo de la función de evaluación estadística.	12
Figura 4. Modelo DNV. Diagrama de flujo de la función de evaluación de la condición.	13
Figura 5. Modelo DNV. Diagrama de flujo de la función de evaluación de la degradación.	13
Figura 6. Modelo DNV. Proceso de modelado para el cálculo de la vida útil restante.	14
Figura 7. Metodología DNO. Diagrama de flujo cálculo Índice de salud Actual.	16
Figura 8. Metodología DNO. Curva típica PoF vs AHI.	17
Figura 9. Esquema simplificado del modelo.	19
Figura 10. Esquema del modelo. Metodología-objetivos.	20
Figura 11. Ejemplo de Matriz de Criticidad.	22
Figura 12. Diagrama de flujo cálculo PHIt	23
Figura 13. Bloque estadístico. HI bajo condiciones ideales.	25
Figura 14. Bloque degradación. HI considerando F_u y F_c mayores que la unidad.	26
Figura 15. Bloque de condición. HI teniendo en cuenta la condición del activo, las condiciones de operación y las condiciones de fiabilidad.	27
Figura 16. FHI(t). Ejemplo genérico.	29
Figura 17. FHI(t) ciclo de vida teniendo en cuenta las frecuencias de los mantenimientos mayores dados por el fabricante.	29
Figura 18. Cálculo gráfico PHIt. Ejemplo genérico. $F_u=1.15$, $F_c=1.05$	30
Figura 19. Gráfica PoF vs HI.	31
Figura 20. Comportamiento AHI. Estrategia 1.	33
Figura 21. Comportamiento AHI. Estrategia 2.	35
Figura 22. Tabla de consecuencias caso de estudio.	41
Figura 23. Bloque estadístico. Caso de estudio.	43
Figura 24. Bloque degradación. Caso de estudio.	45
Figura 25. Comportamiento índice de salud del equipo durante 2013-2035 considerando la estrategia 1	52
Figura 26. Perfil de gastos asociado a la estrategia 1 del caso de estudio.	55
Figura 27. Perfil de gastos asociado a la estrategia 2 del caso de estudio.	56
Figura 28. Mapa de salud de una flota de activos.	60

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo ha sido desarrollado en el grupo de investigación de “Sistemas Inteligentes de Mantenimiento” (SIM), Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas I, de la Universidad de Sevilla.

Este grupo ha tenido siempre presente que la gestión de activos, antes considerada táctica, es ahora una cuestión de estrategia, dadas las implicaciones que tiene para el correcto desarrollo de la política de negocio. Cada vez más, el gestor de mantenimiento acompaña su experiencia con el uso de técnicas y modelos que le permiten tomar decisiones en su día a día de manera objetiva y justificable ante la dirección. Este hecho motivó a este grupo de investigación a desarrollar un marco para el mantenimiento y la gestión de activos [4], el cual integra modelos y herramientas encontradas en la literatura y/o empleadas en la práctica en empresas con amplia excelencia en este campo.

El presente trabajo pretende contribuir al avance de dicho marco mediante el desarrollo de un modelo que permita el análisis de diferentes estrategias de mantenimientos mayores del activo, para evaluar con mayor precisión su conveniencia en función a las condiciones de operación de este.

Lo anterior permitirá minimizar la incertidumbre en el cálculo del coste de ciclo de vida del activo y aumentar la eficiencia del proceso de toma de decisiones relacionadas con el control de fallos.

1.1 Motivación

A la hora de definir una frecuencia de mantenimientos mayores para un activo, es interesante conocer en que condiciones esta siendo operado, con la finalidad de tener un conocimiento más certero del estado de condición en el que se encuentra cuando alcance el momento de la reinversión. De esta manera, se podría evitar estar devengando unos costes de correctivos y preventivos mucho mayores de lo que cabría esperar en ese momento o al contrario, al equipo todavía le quedan horas de funcionamiento manteniéndose en unos niveles de fiabilidad controlados.

Este hecho hace especialmente interesante investigar en esta área y lograr un mayor entendimiento de como afecta las condiciones reales de operación a la probabilidad de fallo del activo y por tanto a su coste de ciclo de vida. El modelo propuesto trata de dar respuesta a esta cuestión y se ofrece como una herramienta de apoyo para tomar decisiones relacionadas con el control de fallos que maximicen la rentabilidad y minimicen los riesgos operacionales y financieros de la organización.

1.2 Coste de ciclo de vida del activo

El coste de ciclo de vida del activo hace referencia a todos aquellos costes generados por el activo durante su ciclo de vida y se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases (diseño, fabricación y producción), calculando el coste de estas funciones y aplicando los costes apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida [5]. Las categorías principales de costes son las siguientes [6]:

- *Costes de investigación, diseño y desarrollo:* planificación inicial, análisis de mercado, investigación del producto, requisitos de diseño e ingeniería, etc.
- *Costes de producción, adquisición y construcción:* ingeniería industrial y análisis de operaciones, producción (fabricación, montaje y pruebas), construcción de instalaciones, desarrollo del proceso, operaciones de producción, control de calidad y requisitos iniciales de apoyo a la logística.

- *Costes de operación y apoyo*: insumos de operaciones del sistema de producción, mantenimiento planificado, mantenimiento correctivo y costes de apoyo logístico durante el ciclo de vida del sistema.
- *Costes de retirada y eliminación*: eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema y reciclaje de material.

Desde el punto de vista financiero, dos tipos de costes son generados a lo largo del ciclo de vida del activo [7]:

- *CAPEX (Capital Expenditure)*: define las inversiones realizadas por la organización, tanto en la adquisición como en la mejora de los bienes de capital o activos físicos.
 - Costes de investigación, diseño y desarrollo: planificación inicial, análisis de mercado, investigación del producto, requisitos de diseño e ingeniería, etc.
 - Costes de adquisición y construcción: ingeniería industrial y análisis de operaciones, producción (fabricación, montaje y pruebas), construcción de instalaciones, desarrollo del proceso, operaciones de producción, control de calidad y requisitos iniciales de apoyo a la logística.
- *OPEX (Operational Expenditure)*:
 - Costes de operación y apoyo: insumos de operaciones del sistema de producción, mantenimiento planificado, mantenimiento correctivo, penalizaciones por eventos de fallos y costes de apoyo logístico durante el ciclo de vida del sistema.
 - Costes de retirada y eliminación: eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema y reciclaje del material.

Una estructura de desglose del coste de ciclo de vida es mostrado en la Figura 1. Tradicionalmente, el CAPEX y el OPEX se han utilizado por separado porque se centraban en objetivos específicos, el CAPEX para realizar la mejor inversión, y el OPEX para alcanzar la eficiencia operativa [8]. Sin embargo, el modelo propuesto en el presente trabajo busca la eficacia de la gestión de los activos en los resultados a largo plazo, de manera que se centra en el TOTEX, siendo este la suma del CAPEX y del OPEX.

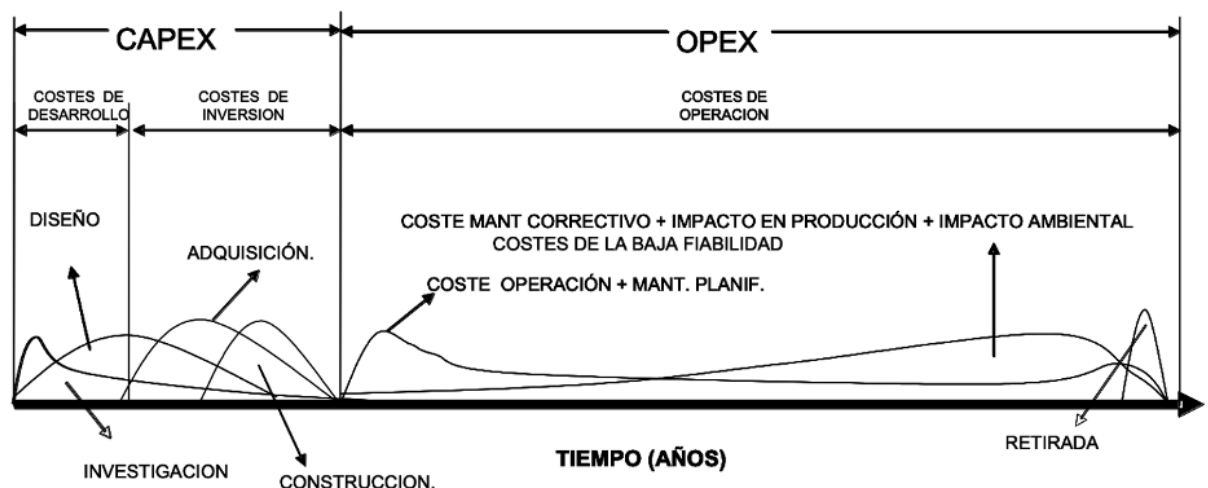


Figura 1. Estructura de costes en el Ciclo de Vida de un activo.

1.3 Impacto de la fiabilidad en el coste de ciclo de vida

Los costes de operación y mantenimiento son los más complicados de predecir y a su vez son los más significativos del ciclo de vida de un activo. En algunos casos, estos costes podrían llegar a exceder hasta diez veces los costes iniciales de adquisición [9]. Para dar respuesta a esta problemática, Woodhouse plantea que es necesario evaluar y cuantificar de forma detallada tanto el aspecto de costes como el de fiabilidad, factor que permite predecir la pérdida de continuidad operacional del activo debido a eventos de fallos imprevistos y evaluar el impacto de estos en el coste de ciclo de vida [10]. Cuando el proceso de producción se ve afectado por gran cantidad de eventos de fallos imprevistos, se empieza a generar altos costes asociados principalmente con la recuperación de la función del activo y con un impacto creciente en el proceso de producción (costes de penalización).

El cálculo del Coste Total por Fiabilidad (CTPF) corresponde con el sumatorio del producto de la tasa de fallo de cada modo de fallo del activo por la consecuencia económica del mismo (costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional) como muestra la expresión (1).

$$CTPF = \sum_{i=1}^F \lambda_i C_{f_i} \quad (1)$$

donde

λ_i tasa de fallos del modo de fallo i .

C_{f_i} consecuencia económica del modo de fallo i .

F número total de modos de fallo del activo.

En la gran mayoría de las metodologías actuales los procesos de estimación del CTPF proponen análisis de fiabilidad normalmente basados en tasas de fallos constantes o en su caso variables pero sin tener en cuenta las condiciones reales de explotación (ubicación y operación) del activo, lo que conduce normalmente a toma de decisiones con un alto grado de incertidumbre y por ende, muchas veces erróneas.

1.4 Objetivo

Mediante el modelo desarrollado en el presente trabajo se pretende alcanzar los siguiente objetivos:

- Disponer de una información estructurada de los activos en función de su importancia para cumplir los objetivos del negocio, con el fin de obtener una base sobre la cuál dar inicio a un proceso de optimización basado en la aplicación de técnicas de Ingeniería de Fiabilidad y Mantenimiento.
- Obtener una medida de la condición actual (PHI_t) y futura (FHI_t) del estado del activo teniendo en cuenta las condiciones reales de explotación del mismo (ubicación y operación).
- Estimar las tasas de fallos de los diferentes modos de fallos del activo en función de su condición.
- Disminuir la incertidumbre en el cálculo del CTPF y por ende del coste de ciclo de vida del activo.
- Hallar la estrategia de mantenimientos mayores cuyo perfil de gasto asociado minimice el gasto total (TOTEX) de ciclo de vida del activo.

Como objeto final, este trabajo pretende ofrecer una herramienta objetiva para mejorar el análisis de coste de ciclo de vida de un activo, aumentando la eficiencia del proceso de toma de decisiones relacionadas con el control de fallos, maximizando la rentabilidad de la organización y minimizando los riesgos operacionales (fiabilidad y disponibilidad) y financieros relacionados con el ciclo de vida de los activos.

1.5 Sumario

El documento se organiza de la siguiente manera: en el capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica de las dos metodologías principales integradas en el modelo desarrollado. Estas metodologías son: “Análisis del Coste de Ciclo de Vida” e “Índice de Salud de Activos”¹. El capítulo 3, es el capítulo principal del documento y en él se desarrolla el modelo propuesto. Después, en el capítulo 4, se aborda un caso de estudio, el modelo es aplicado a 49 equipos de una planta de regasificación, centrándose posteriormente en definir la mejor estrategia de mantenimiento mayor para un grupo motobomba de baja presión de GNL. Finalmente, en el capítulo 5, se comentan las conclusiones extraídas del trabajo y las posibles líneas futuras de investigació

¹ No se realiza una revisión bibliográfica de la metodología de “Análisis de Criticidad” ya que es un campo muy estudiado e investigado, con multitud de artículo de investigación que profundizan tanto en la parte teórica como práctica de la misma . Si el lector quiere ahondar en los diversos modelos existentes para esta metodología acudir a [4][26].

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Análisis del Coste de Ciclo de Vida (ACCV)

Algunas de las metodologías propuestas de ACCV en los últimos años incluyen análisis de fiabilidad que permiten cuantificar el impacto económico que generan los fallos de un activo. Se describe a continuación tres modelos básicos de ACCV que evalúan este impacto.

2.1.1 Modelo de Tasa de Fallos Constante (Modelo de Woodward)

Este modelo de ACCV propone el siguiente esquema para calcular los costes de ciclo vida de un activo [11], [12]:

1. Establecer las condiciones operacionales del sistema. Describir los modos de operación del sistema (carga completa, media carga, sin carga) y las capacidades de producción a satisfacer.
2. Establecer los factores de utilización. Estos factores deben indicar el estado de funcionamiento dentro de cada modo de operación.
3. Identificar las distintas opciones a ser evaluadas. Seleccionar las alternativas existentes que pueden cubrir con las necesidades de producción exigidas.
4. Identificar para cada alternativa todas las categorías de costes básicos: inversión inicial, desarrollo, adquisición, mantenimiento planificado, reposición.
5. Determinar para cada alternativa los costes totales por fiabilidad (CTPF).
6. Identificar los principales tipos de fallos y la frecuencia de ocurrencia en el tiempo, la cual será un valor constante a lo largo del ciclo de vida del activo.
7. Determinar los costes críticos. Identificar las categorías de costes de mayor impacto, y analizar los factores que propician los altos costes.
8. Calcular todos los costes en valor presente (P) para cada alternativa. Definir el factor de descuento y el periodo de vida útil esperado y estimar los costes totales en valor presente por cada alternativa evaluada.
9. Seleccionar la alternativa ganadora. Comparar los costes totales de las alternativas evaluadas y seleccionar la opción que menor coste genere para el periodo de vida útil esperado.

En referencia a lo anterior, Woodward propone la expresión (2) para calcular los diferentes costes que genera un activo industrial a lo largo de su ciclo de vida [11], [13]

$$CTCV_P = \sum_{t=1}^T [CI_P + CO_P + CMP_P + CTPF_P + CMM_P] \quad (2)$$

donde

$CTCV_P$ Costes Totales de Ciclo de Vida en valor presente, para una tasa de descuento (i) y un periodo de vida útil esperado (T).

CI_P Coste Inicial de adquisición e instalación en valor presente.

CO_P Costes Operacionales en valor presente (normalmente dado como valor anualizado).

CMP_P Costes de Mantenimiento Preventivo en valor presente (normalmente dado como valor anualizado).

- CTPF_p Costes Totales por Fiabilidad en valor presente (normalmente dado como valor anualizado) (se asume tasa de fallos constante, por lo cual el impacto en costes es el mismo en todos los años).
- CMM_p Costes de Mantenimientos Mayores en valor presente.

A continuación se detallan los pasos a seguir para estimar CTPF_p según el modelo de Woodward [7]:

1. Definir los tipos de fallos (f). Donde $f=1...F$ para F tipos de fallos.
2. Definir la frecuencia de fallos esperada por año δ_f (fallos/año). Se asume como un valor constante por año para el ciclo de vida útil esperado.

$$\delta_f = \frac{N}{T} \quad (3)$$

donde

N número total de fallos.

T número total esperado de años de vida útil.

3. Calcular los costes asociados a cada tipo de fallo C_f (€/fallo). Estos costes están asociados a: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

$$C_f = \sum_{f=1}^F MTTR_f \cdot Cpe_f \quad (4)$$

donde

MTTR_f tiempo medio para reparar cada fallo (horas/fallo).

Cpe_f costes de penalización por hora (€/hora).

4. Calcular los costes totales por fallos por año TCP_f (€/año).

$$TCP_f = \sum_{f=1}^F C_f \cdot \delta_f \quad (5)$$

5. Calcular los costes totales por fiabilidad en valor presente CTPF_p. Se estima su valor monetario en función del número de años de vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i).

$$CTPF_p = TCP_f \frac{(1+i)^T - 1}{i \cdot (1+i)^T} \quad (6)$$

A los costes totales por fiabilidad se suma el resto de costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.) para calcular el coste total en valor presente con la tasa de interés seleccionada y los años de vida útil esperados como indica la expresión (2).

La principal limitación de este modelo está relacionada con la forma de calcular el impacto de la fiabilidad en los costes, ya que se considera que las frecuencias de fallos son constantes a lo largo del ciclo de vida del activo, lo cual, no es real, ya que habitualmente, la frecuencia de los fallos varía por la influencia de diferentes factores (operaciones, mantenimiento preventivo, calidad de materiales, procesos de deterioro, etc.).

Principalmente este modelo se aplica en las fases iniciales del diseño de los sistemas de producción, ya que proporciona estimaciones rápidas de los costes que pueden ser un apoyo a la hora del proceso de selección de las diferentes alternativas [14].

2.1.2 Modelo de Tasa de Fallos Determinista

Los pasos para aplicar este modelo de ACCV son los siguientes [15]:

1. Definir el proceso de producción a evaluar.
2. Identificar las posibles alternativas que cubrirán las demandas de producción.
3. Definir para cada alternativa la estructura detallada de costes. El modelo clasifica los costes en cinco categorías:
 - Costes de investigación y desarrollo.
 - Costes de construcción y producción.
 - Costes de mantenimiento preventivo.
 - Costes de mantenimiento correctivo - costes por fiabilidad.
 - Costes de desmontaje – retirada.
4. Cuantificar para cada alternativa los costes por cada una de las categorías definidas.
5. Identificar para cada alternativa los factores que más contribuyen en el incremento de los costes por categoría.
6. Proponer estrategias para cada alternativa que ayuden a minimizar los costes de mayor impacto (análisis de sensibilidad) incluyendo las recomendaciones propuestas para disminuir el impacto de los factores de mayor contribución a los costes.
7. Cuantificar para cada una de las alternativas evaluadas, los costes totales en valor equivalente anual (A), para una tasa de descuento (i) y un número de años de servicio esperado (t).
8. Seleccionar la alternativa que genere los costes más bajos a lo largo del periodo de vida útil esperado.

A diferencia del modelo de “Tasa de Fallos Constante”:

- Los costes totales son estimados en valores anuales equivalentes (A).
- Las frecuencias de fallos pueden variar de forma determinística en los diferentes periodos de tiempo que conforman el ciclo de vida útil esperado.

En cuanto a los costes por fiabilidad este modelo propone evaluarlos de la siguiente manera:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos (f). Donde $f=1 \dots F$, para F tipos de fallos.
2. Definir de forma determinista para cada tipo de fallo, la frecuencia de ocurrencia esperada para cada periodo de tiempo δ_f^t . Esta frecuencia se determina a partir de historiales de fallos, bases de datos y/o experiencia del personal de mantenimiento y operaciones.
3. Calcular los costes por fallos C_f (€/fallo). Estos costes están asociados a: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.
4. Calcular los costes por tipo de fallo por año CP_f^t (€/año).

$$CP_f^t = \delta_f^t \cdot C_f \quad (7)$$

5. Calcular el valor presente para cada año (t) a una tasa de descuento (i) de CP_f^t

$$PCP_f^t = CP_f^t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (8)$$

6. Calcular los costes totales por tipos de fallos en valor presente $PTCP_f$ hasta el número de años de vida útil esperado (T).

$$PTCP_f = \sum_{t=1}^T PCP_f^t \quad (9)$$

7. Calcular el coste total equivalente anual AETC (€/año) para el número de años de vida útil esperado (T) y la tasa de descuento definida (i).

$$AETC = PTCP_f \cdot \frac{i \cdot (1 + i)^T}{(1 + i)^T - 1} \quad (10)$$

Este coste representa el coste anual promedio que se necesita cada año para poder hacer frente a los problemas de fiabilidad ocasionados por los distintos tipos de fallos, a lo largo del ciclo de vida analizado y con el factor de descuento utilizado.

A los costes por fiabilidad se suma el resto de costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.) calculándose el coste total en valor equivalente anual.

La principal limitación de este modelo está relacionada con el proceso de recopilación de información sobre la frecuencia de los fallos. Si la calidad de los datos estadísticos de las fallos recopilados no es buena, probablemente no se realicen estimaciones de costes reales y se tomen decisiones erróneas durante el ciclo de vida del activo.

Este método se utiliza frecuentemente en las fases intermedias del proyecto, ya que se dispone de mayor precisión sobre las diferentes alternativas a evaluar y se puede guiar de manera más eficiente la búsqueda de información relacionada con los tipos de fallos y su frecuencia de ocurrencia [14].

2.1.3 Modelo de Tasas de Fallos por Distribución de Weibull

Este modelo es similar al método de “Tasas de Fallos Constante” en cuanto a estructura de análisis de costes, pero tiene como principal diferencia el proceso de estimación de los costes por fiabilidad, ya que las frecuencias de fallos se calculan a partir de la distribución probabilística de Weibull. Los costes por fiabilidad son evaluados de la siguiente manera en este modelo [16]:

1. Identificar para cada alternativa a evaluar los principales tipos de fallos. Donde $f = 1 \dots F$ para F tipos de fallos.
2. Determinar para cada tipo de fallo los tiempos entre fallos esperados t_f a través de históricos de fallos, bases de datos y/o experiencia del personal de mantenimiento y operaciones.
3. Calcular los costes por fallos C_f (€/fallo). Estos costes están asociados a: costes de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.
4. Determinar de forma probabilística la frecuencia de fallos esperada δ_f con la distribución de Weibull. Este proceso se realiza a partir de los tiempos entre fallos t_f registrados por tipo de fallo. Si la variable aleatoria t_f tiene distribución de Weibull de parámetros $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, su función de densidad viene dada por la expresión (11).

$$f(t_f) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t_f^{\beta-1}}{\alpha} \right) \cdot e^{-\frac{t_f^\beta}{\alpha}} \quad (11)$$

Cuya media μ es:

$$\mu = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (12)$$

La varianza es:

$$\sigma^2 = \alpha^2 \cdot \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right) \quad (13)$$

La variable aleatoria está representada por el tiempo que el sistema funciona sin que se produzca un fallo, donde el MTBF es el valor esperado de la variable aleatoria t_f y es igual que la media μ .

$$MTBF = \mu = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (14)$$

donde

MTBF tiempo promedio entre fallos – valor de tiempo esperado entre fallos (tiempo/fallos).

Γ función gamma, valores tabulados [17].

α vida característica, se calcula a partir de los tiempos entre fallos.

β parámetro de forma, se calcula a partir de los tiempos entre fallos.

Los parámetros α y β se calculan mediante las expresiones (15) y (16) respectivamente [18] :

$$\alpha = \exp\left(\frac{\frac{N}{\sum_{i=1}^N A_{fi}} - \left(\sum_{i=1}^N A_{fi} \cdot \ln(t_{fi})\right)}{\left(\sum_{i=1}^N A_{fi} - \ln(t_{fi})\right) - \left(\sum_{i=1}^N A_{fi} \cdot \ln(t_{fi})\right)}\right) \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N A_{fi}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\ln(t_{fi})} \cdot (1 - \ln(\alpha))} \quad (16)$$

donde

$$A_{fi} = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{f_i}{N+1}}\right)\right)}{\ln(t_{fi})} \quad (17)$$

En las expresiones (15), (16) y (17) f_i es el número del evento de fallo específico, N es el número total de fallos evaluados y t_{fi} es el tiempo medido entre fallos en cuestión.

Con los valores de los parámetros α y β se obtiene la frecuencia de fallos mediante la expresión (18).

$$\delta_f = \frac{1}{MTBF} \quad (18)$$

5. Calcular los costes totales por fiabilidad por año TCP_f (€/año), generado por los diferentes tipos de fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad, a través de la ecuación (19).

$$TCP_f = \sum_{f=1}^F C_f \cdot \delta_f \quad (19)$$

6. Calcular los costes totales en valor presente $PTCP_f$ correspondiente a la vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i).

$$PTCP_f = TCP_f \frac{(1+i)^T - 1}{i \cdot (1+i)^T} \quad (20)$$

Este valor representa la cantidad de dinero que se necesita hoy para poder hacer frente a los gastos anuales esperados por los fallos durante T años.

A los costes por fiabilidad se suma el resto de costes evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.) calculándose el coste total en valor presente para la tasa de descuento seleccionada y los años de vida útil esperados.

La principal limitación de este modelo es que al estimar la frecuencia de fallos para cada año con el MTBF calculado con la distribución de Weibull, los costes anuales por fiabilidad se mantienen constantes para cada uno de los años de vida útil esperada del activo.

Este modelo se aplica principalmente en las fases finales del proyecto, ya que se dispone de información de fiabilidad más precisa a la realidad operativa de las diferentes alternativas a evaluar.

2.2 Índice de Salud de Activo (AHI)

El Índice de Salud de Activo (AHI) es una puntuación diseñada para caracterizar la condición del activo y por ende el rendimiento del mismo en términos del cumplimiento del rol establecido por la organización. Este índice debe cumplir los siguientes requisitos [19]:

- Ser indicativo de la idoneidad del activo para dar continuidad al servicio y representativo de la salud general del activo.
- Contener medidas objetivas y verificables de la condición del activo, en lugar de observaciones subjetivas.
- Ser comprensible y ser fácilmente interpretado.

A continuación se comentan los principales modelos de Índice de Salud de Activos existentes en la literatura. Para facilitar la comprensión de cada modelo, se sigue la siguiente estructura:

- *Entradas*: datos de la condición, operación del equipo y alguna vez información de la ubicación geográfica y la fiabilidad de las piezas de repuesto utilizadas en el mantenimiento.
- *Metodología para el cálculo del índice*: los modelos integran las fuentes de información mediante la ponderación de factores.
- *Salidas del modelo*.

2.2.1 Modelo Kinetrics

Este modelo propone la evaluación del estado general de la condición de transformadores.

2.2.1.1 Entradas

El modelo utiliza datos de servicio y diagnóstico, datos históricos de las variables de operación a lo largo del ciclo de vida del activo. Algunos ejemplos serían: carga de trabajo del transformador, resultado de análisis en laboratorio de muestras de aceite del transformador, número de operaciones en el cambiador de tomas, pruebas in situ como pruebas de aislamiento, termógrafos, verificación del estado de corrosión.

2.2.1.2 Metodología para el cálculo del índice

A través de datos de variables de entrada, el algoritmo de evaluación [20] asigna calificaciones a diferentes subsistemas del sistema.

Las variables relacionadas con el cambiador de tomas del transformador tienen un mayor peso en el índice de salud que todas las demás ya que se ha observado que la mayoría de las veces que un transformador está fuera de servicio es consecuencia del envejecimiento y los modos de fallo relacionados con las partes del equipo del cambiador de tomas.

Se pondera cada variable entre 1 y 10, siendo aquellas variables con valores cercanos a 1 aquellas cuya relación con el envejecimiento del equipo es casi nula y las variables con los valores mayores a 5 aquellas que reflejan con mayor precisión el envejecimiento del equipo.

2.2.1.3 Salidas del modelo

Como resultado se proporciona una composición de todas las variables normalizadas en un solo indicador. Este varía entre 0 y 100, correspondiendo el valor 100 a un valor de equipo nuevo y el valor 0 a un equipo que ha alcanzado el final de su vida útil y necesita ser reemplazado.

El valor del índice, a su vez, está relacionado con la probabilidad de fallo del equipo y también se puede dividir en diferentes rangos. Véase Figura 2 [20]. Para cada uno de estos rangos, en la Tabla 1 [19] se propone una serie de recomendaciones y medidas a tener en cuenta para la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento. Estas pueden ser muy útiles a la hora de planificar futuras sustituciones de equipos en base a la condición general de los activos y no en base a la edad.

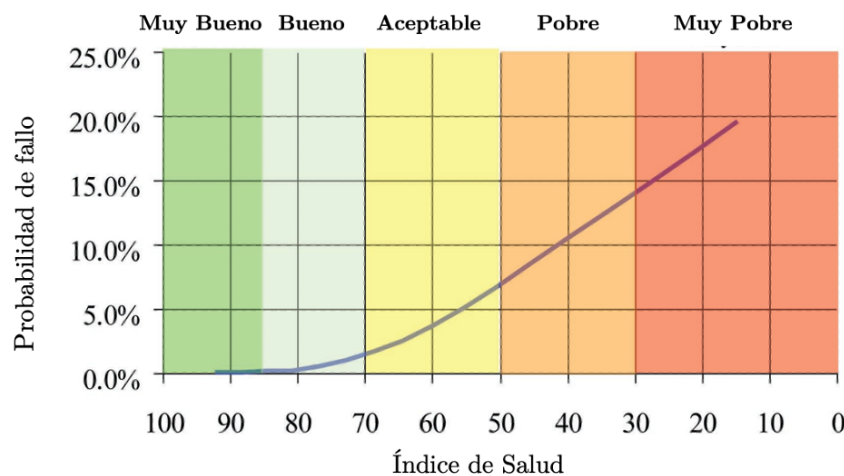


Figura 2. Modelo Kinetrics. Probabilidad de fallo vs Índice de Salud

Tabla 1. Modelo Kinetics. Recomendaciones de mantenimiento en función del rango de salud.

HI %	Condición	Descripción	Vida esperada	Requerimientos
85-100	Muy buena	Cierto envejecimiento o deterioro menor de un número limitado de componentes	Más de 15 años	Mantenimiento normal
70-85	Buena	Deterioro significativo de algunos componentes	Más de 10 años	Mantenimiento normal
50-70	Aceptable	Deterioro significativo generalizado o deterioro grave de componentes específicos	Hasta 10 años	Aumentar las pruebas de diagnóstico, posibles trabajos de reparación o sustitución en función de la criticidad
30-50	Pobre	Deterioro grave generalizado	Menos de 3 años	Iniciar el proceso de planificación para sustituir o reconstruir teniendo en cuenta el riesgo y las consecuencias del fracaso
0-30	Muy pobre	Deterioro grave extendido	Cerca del final de vida	Evaluar inmediatamente el riesgo, sustituir o reconstruir en función de la evaluación

2.2.2 Modelo de cálculo del índice de salud de activos por DNV GL.

Este modelo propone una metodología para el cálculo del índice de salud, que junto con la criticidad del activo y las restricciones de fiabilidad del negocio, sirve de apoyo a la hora de la toma de decisiones de los overhaul y las sustituciones de equipos [21].

2.2.2.1 Entradas

El modelo utiliza datos estadísticos de la vida útil del tipo de equipo que se pretende estudiar, información de la condición del activo (carga, edad, pruebas in situ) e información de la fiabilidad a lo largo del ciclo de vida del activo (modos de fallo y frecuencia).

2.2.2.2 Metodología para el cálculo del índice

El proceso para obtener el índice se divide en tres grandes bloques:

- *Función de evaluación estadística:* se estima la vida útil restante estadística de un activo basándose en la distribución de la vida útil esperada del activo y su edad actual. Véase Figura 3.

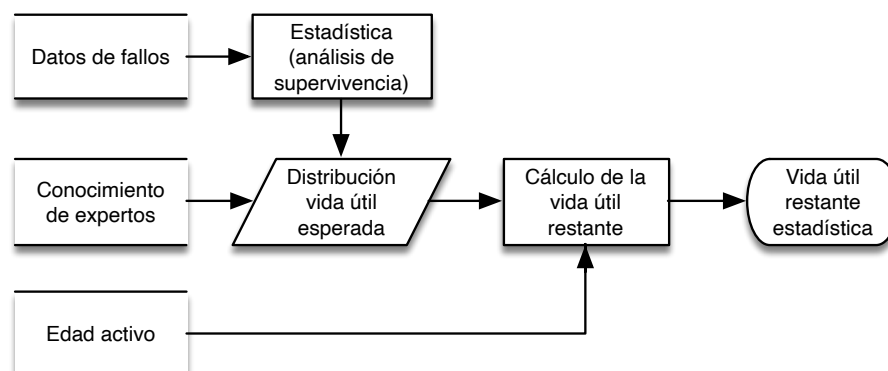


Figura 3. Modelo DNV. Diagrama de flujo de la función de evaluación estadística.

- *Función de evaluación de la condición:* se estima la vida útil restante tras condición ajustando la vida útil restante estadística en función de la severidad de la condición. Esta severidad se determina mediante los modelos de estado. Si el estado es bueno, se utiliza la vida útil estadística, o incluso se aumenta. Si el estado es regular o malo, la vida útil restante tras condición es igual a una fracción de la vida útil estadística. Por último, si el estado es muy deficiente, la vida útil restante tras condición supone un criterio de eliminación (normalmente el fin de la vida útil en un plazo relativamente corto). Véase Figura 4 [21].

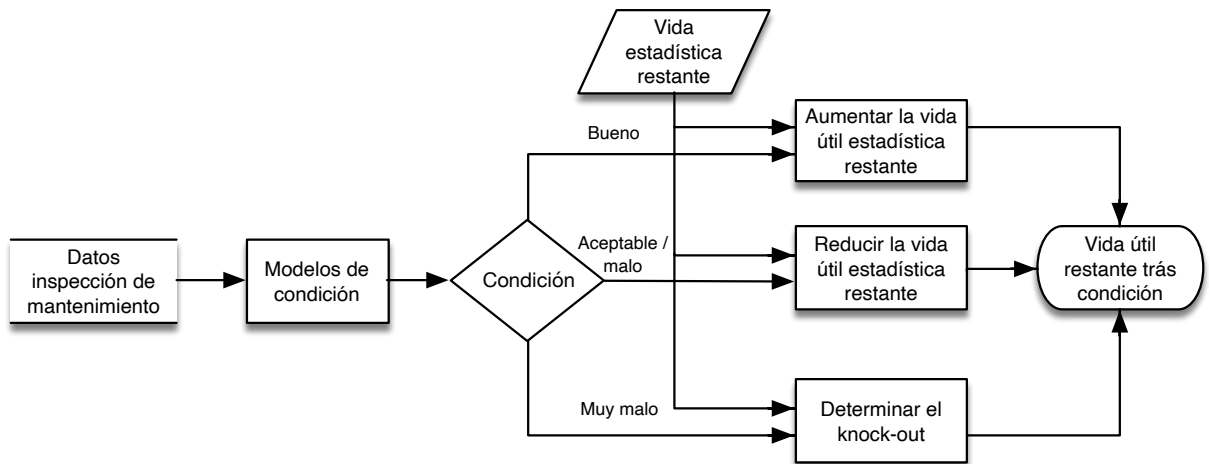


Figura 4. Modelo DNV. Diagrama de flujo de la función de evaluación de la condición.

- *Función de evaluación de la degradación:* se compara datos de degradación del activo con parámetros de diseño, determinándose el impacto en la vida útil restante mediante modelos de envejecimiento y degradación. Por ejemplo, la carga influye en la aceleración del envejecimiento del equipo (número de operaciones, carga, etc.), de manera que los equipos con un historial de operación con más carga tendrán una vida más corta que otro con menos carga para la misma edad del equipo. Véase Figura 5.

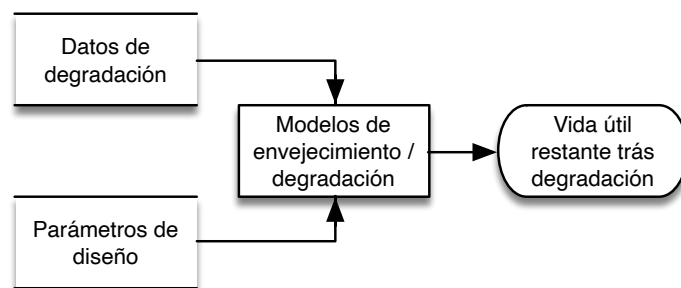


Figura 5. Modelo DNV. Diagrama de flujo de la función de evaluación de la degradación.

2.2.2.3 Salida del modelo

La salida del modelo es la vida útil restante del equipo en años. Como puede observarse en la Figura 6, una vez calculadas las funciones propuestas, se combinan para obtener la vida restante del activo. Concretamente la función de evaluación de la degradación se ejecuta en paralelo con la función de evaluación estadística y de condición, eligiendo la estimación más baja de las dos ramas.

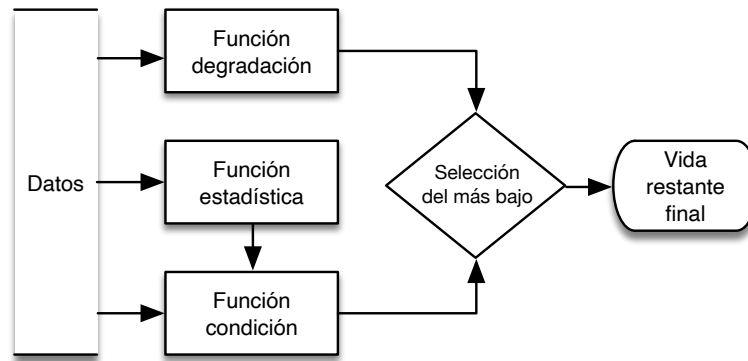


Figura 6. Modelo DNV. Proceso de modelado para el cálculo de la vida útil restante.

2.2.3 Modelo de cálculo del índice de salud de activos por TERNÁ.

Este modelo propone el cálculo del índice de salud de transformadores basándose en parámetros estáticos y dinámicos, con el objeto de obtener una herramienta que sirva de apoyo a la hora de la toma de decisiones en cuanto a inversiones de capital en reemplazos de equipos [22], [23].

2.2.3.1 Entradas

- Parámetros estáticos: asociados con el emplazamiento donde se ubica el activo, son invariables en el tiempo e independientes del activo. Por ejemplo: recurrencia de fenómenos catastróficos, probabilidad de tormenta eléctrica, etc.
- Parámetros dinámicos: asociados al activo, sus valores cambian con la edad del activo y pueden medirse in situ mediante pruebas funcionales y visuales, así como en pruebas de laboratorio. Cada parámetro se conoce como índice de salud (HI).
 - $HI_{\text{dieléctrico}}$: parámetros relacionados con la condición dieléctrica y térmica. Proporcionan información sobre problemas eléctricos (descargas parciales, descargas de baja energía, arcos eléctricos) y térmicos (puntos calientes, sobrecargas). Se obtienen del análisis del gas disuelto.
 - $HI_{\text{térmico}}$: parámetros relacionados con la condición térmica del papel aislante. Se obtienen del análisis del CO₂ y CO.
 - $HI_{\text{mecánico}}$: parámetros relacionados con la condición mecánica del transformador. Se obtienen de pruebas eléctricas in situ (mediciones de inductancia, análisis de respuesta de frecuencia de barrido, etc.).
 - HI_{aceite} : parámetros relacionados con la condición del aceite aislante. Se obtienen del análisis del contenido de agua, acidez, voltaje de ruptura de 50–60 Hz (BDV) y las determinaciones del factor de disipación dieléctrica (DDF).

2.2.3.2 Metodología de cálculo del índice

Se estandarizan los parámetros con sus pesos correspondientes utilizando pautas y regulaciones internacionales (IEC, IEEE, CIGRE, etc.) para posteriormente calcular el HI mediante la ecuación (21).

$$HI = \frac{HI_{\text{dieléctrico}} + HI_{\text{térmico}} + HI_{\text{mecánico}} + HI_{\text{aceite}}}{HI_{MAX}} \quad (21)$$

donde HI_{MAX} es un número prefijado y, como consecuencia, el HI de cada activo puede expresarse por unidades (p.u.).

2.2.3.3 Salidas del modelo

La salida del modelo es un valor HI entre 0 y 0.5, de manera que se clasifican los activos en cuatro clases como se muestra en la Tabla 2. Estos rangos expresan el diferente nivel de resistencia restante en términos de estado eléctrico, térmico, mecánico y de aceite. Aquellos activos con una condición “muy buena” o “buena” corresponde a equipos con altos niveles de fiabilidad y se le aplican prácticas de mantenimiento comunes y estándares. Aquellos activos clasificados como “aceptable” serán aquellos con bajos niveles de fiabilidad y se le deberá aplicar un aumento de la frecuencia de análisis o una investigación más profunda. Por último, los activos clasificados como "dudosa" deben considerarse en estado crítico y requieren una sustitución.

Tabla 2. Modelo Terna. Rangos de HI.

Índice de Salud (HI)	Condición
0 - 0.1	Muy buena
0.1 – 0.2	Buena
0.2 -0.3	Aceptable
> 0.3	Dudosa

2.2.4 Metodología de índices de activos de red comunes DNO del Reino Unido

Esta metodología se presenta dentro de un marco común de definiciones, principios y metodologías de cálculo, adoptado por todos los operadores de redes de distribución en UK, para la evaluación, previsión y reporte regulatorio del riesgo de activos. Se recoge en el documento “DNO common network asset indices methodology” [2], del Grupo de Trabajo sobre Metodología de Índices de Activos de Red (del IAM, UK) y cumple con los requisitos de la condición estándar 51 (SLC 51) de la licencia de distribución de electricidad para RIIO-ED1 (del 1 de abril de 2015 al 31 de marzo de 2023).

2.2.4.1 Entradas

Se requiere un número importante de datos de entrada, tales como los que se citan a continuación:

- Identificación del activo: categoría del equipo, edad actual, vida esperada, nombre del fabricante, modelo y localización de la instalación.
- Datos de operación registrados durante un determinado período de tiempo, agregados convenientemente para conocer el tiempo en el que el equipo ha estado sometido a estrés, número de arranques y paradas, consumos, etc.
- Condición del equipo: resultados de los análisis realizados al equipo in situ, resultados de lecturas de variables físicas como temperatura y vibraciones, resultados de inspecciones visuales, medida de espesores, termografías, etc.

2.2.4.2 Metodología para el cálculo del índice

La metodología propuesta es un cálculo secuencial del índice siguiendo una serie de pasos. Véase Figura 7.

1. Obtener la vida normal estimada asociada a la categoría de equipo.
2. Obtener la vida estimada en función de los factores de carga, ubicación y la vida normal estimada.
3. Calcular la Tasa de Envejecimiento.
4. Obtener el Índice de Salud Inicial.
5. Obtener el Índice de Salud Actual en función de los modificadores de salud y fiabilidad y el Índice de Salud Inicial.

6. Calcular la probabilidad de fallo actual.

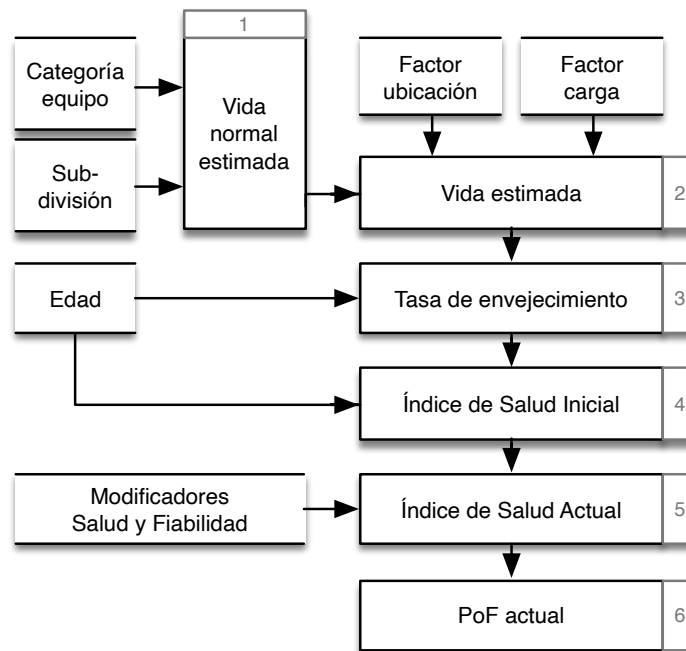


Figura 7. Metodología DNO. Diagrama de flujo cálculo Índice de salud Actual.

2.2.4.3 Índice de salida

El resultado del modelo es el AHI, un valor entre 0.5 y 10, que ofrece información sobre la vida útil restante del activo. El Índice de Salud agrupa los activos en cinco bandas (HI1 a HI5) como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterio clasificación HI.

Banda HI	Criterio de clasificación HI
HI1	0.5 - 3
HI2	3 - 5.5
HI3	5.5 - 6.5
HI4	6.5 - 8
HI5	8 - 10

Los valores del AHI se vinculan posteriormente a valores de probabilidad de fallo mediante la ecuación (22).

$$PoF_t = K \left[1 + (C \cdot H) + \frac{(C \cdot H)^2}{2!} + \frac{(C \cdot H)^3}{3!} \right] \quad (22)$$

donde

PoF_t probabilidad de fallo estimada dada situación actual del activo.

K tasa de fallo estándar del activo.

C constante que representa un valor donde la probabilidad de fallo del activo en la peor condición es 10 veces superior a la probabilidad de fallo del activo como nuevo.

H_t $H=HI$ si $HI > 4$

$H=4$ si $HI \leq 4$

La Figura 8 ilustra dónde se sitúan las bandas del Índice de Salud en una curva típica AHI / PoF. Para un activo debidamente mantenido, se puede considerar que sus tasas de fallo se mantienen dentro los valores esperados mientras el indicador de salud no sobrepase el valor AHI=4.0, evolucionando al alza, de una forma todavía controlada hasta el valor de AHI=5.5, punto a partir del cual la probabilidad de fallo comienza a aumentar de forma exponencial.

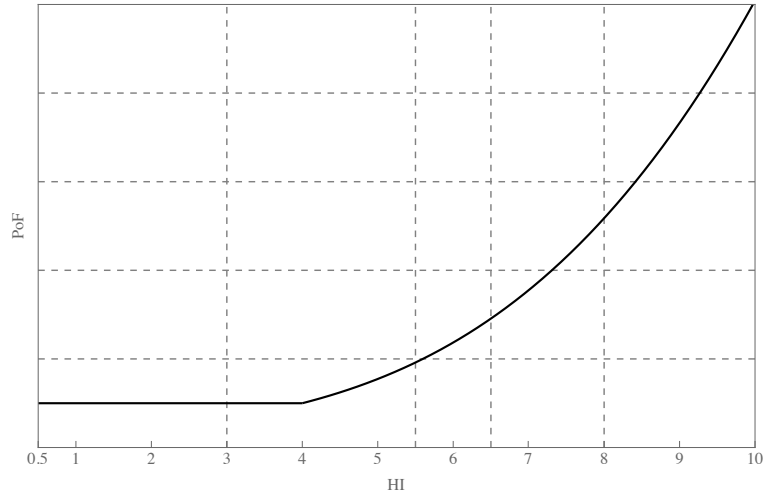


Figura 8. Metodología DNO. Curva típica PoF vs AHI.

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo desarrollado en el presente trabajo aglutina diversas metodologías disponibles en la literatura [1], [11] o alguna adaptación de ella [2]. Un esquema simplificado del modelo se presenta en la Figura 9. El modelo esta constituido por un bloque de “Datos requeridos” y tres bloques de metodologías: “Análisis de Criticidad” (AC), “Metodología de Índice de Salud de Activo” (AHI) y “Análisis de Coste de Ciclo de Vida” (ACCV). Un lazo de retroalimentación permite el análisis de diversas estrategias de mantenimientos mayores con el objeto de encontrar aquella que minimice los riesgos operacionales (fiabilidad y disponibilidad) y minimice el coste total (TOTEX) de ciclo de vida del perfil de gasto asociado.

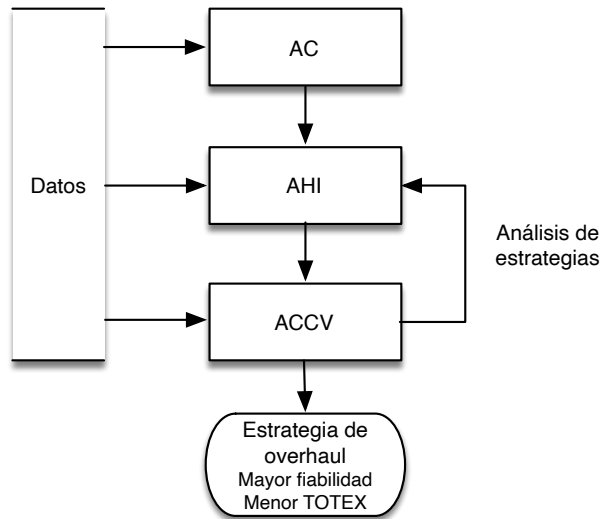


Figura 9. Esquema simplificado del modelo.

A continuación se explica brevemente los objetivos de cada bloque del modelo, los cuales serán desarrollados con mayor profundidad en los apéndices de este capítulo. Para una mayor comprensión, el lector puede apoyarse en la Figura 10.

Con el objeto de obtener una base sobre la cuál dar comienzo a cualquier proceso de optimización basado en la aplicación de técnicas de ingeniería de fiabilidad y mantenimiento es aconsejable aplicar técnicas de criticidad [24]. Los activos bajo estudio se analizan en base a la importancia de su función desempeñada para que la organización cumpla y alcance sus objetivos. Mediante una metodología AC se priorizan los activos, focalizando la toma de decisiones sobre aquellos activos más críticos para la organización.

Una vez puesto el foco en aquellos activos críticos, se aplica una metodología AHI. Esta puede verse como una herramienta que procesa datos sobre el estado de los activos, con el objeto de medir la condición general del mismo teniendo en cuenta las condiciones reales de explotación. Se obtiene en primer lugar un índice de salud del activo hasta el momento (PHI_t), para posteriormente proyectarlo a futuro (FHI_t). La tasa de fallo estándar es estimada en función de la condición del activo calculada previamente.

Finalmente, mediante una metodología ACCV y teniendo en cuenta los mantenimientos mayores previstos inicialmente y las tasas de fallos estimadas, se calcula el perfil de gasto del activo. Mediante el lazo de retroalimentación se analizan nuevas estrategias de mantenimientos mayores con el objeto de hallar aquella estrategia que maximice la fiabilidad del activo y minimice el gasto total (TOTEX) del perfil de gasto asociado.

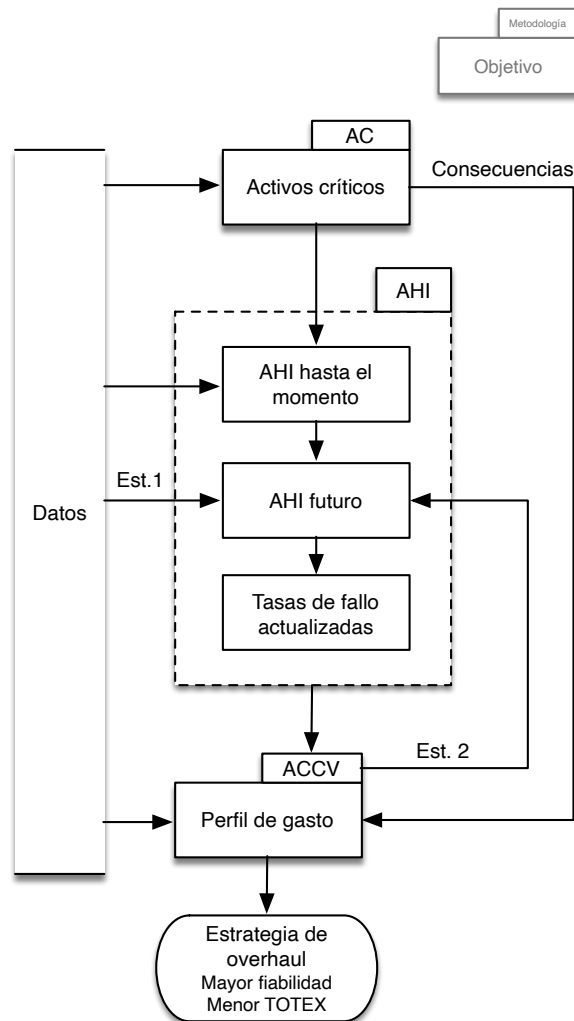


Figura 10. Esquema del modelo. Metodología-objetivos.

El modelo planteado en este trabajo permite principalmente:

- Centrarse en aquellos activos más críticos para satisfacer los objetivos de la organización.
- Obtener una medida más precisa de la condición general del activo en el tiempo, al tener en cuenta las condiciones reales de explotación del mismo.
- Estimar las tasas de fallos en función de la condición del activo.
- Calcular con menor incertidumbre los costes relacionados con el impacto de las probabilidades de fallos futuras de los activos.
- Obtener un perfil de gastos del activo más fiel a la realidad.
- Alcanzar una estrategia de mantenimientos mayores que garantice la mayor fiabilidad y el menor coste total (TOTEX) de ciclo de vida del activo.

Además, este modelo permite al gestor de mantenimiento:

- Justificar la ampliación o reducción de la vida útil del activo.
- Identificar que activos de una flota son candidatos para una sustitución temprana, o una renovación, como consecuencia de un envejecimiento prematuro.
- Identificar las necesidades de inversión de capital.
- Comparar la salud de los equipos ubicados en ubicaciones técnicas similares, para estudiar el posible

deterioro prematuro y optimizar los planes de operación y/o el mantenimiento de los activos en caso de ser necesario.

- Comunicarse de manera más precisa con los fabricantes para comprender el comportamiento de los activos en ubicaciones técnicas específicas.
- Apoyar los procesos de toma de decisiones en futuras inversiones en activos o la extensión de la vida útil de estos.

3.1 Datos requeridos

Para llevar a cabo el proceso de análisis planteado en el modelo es necesario disponer de la información proporcionada por los fabricantes de los equipos y de aquella referente a la condición del activo (datos de servicio y diagnóstico, datos históricos de las variables de operación desde su puesta en servicio) y a la fiabilidad del mismo a lo largo de su ciclo de vida (modos de fallo y frecuencia). También será necesario disponer de datos acerca de los costes soportados por la organización durante todo el ciclo de vida del activo. Es aconsejable disponer de las recomendaciones incluidas en los estándares industriales internacionales de referencia sobre salud de activos industriales y por supuesto contar con el conocimiento y experiencia del personal de mantenimiento y operaciones.

A continuación se nombran algunos de estos datos requeridos para cada bloque del modelo:

- Datos técnicos para el cálculo de la matriz de criticidad.
 - o Listado de activos a analizar.
 - o Tasas de fallos de los activos.
 - o Tabla de consecuencias: apoyo para medir las consecuencias de la pérdida funcional del activo. Se distinguen diversos factores y niveles.
- Datos técnicos específicos por tipo de activo para el cálculo del índice de salud.
 - o Identificación del activo: categoría del equipo, edad actual, vida esperada, nombre del fabricante, modelo y localización de la instalación.
 - o Condiciones operacionales y medioambientales requeridas en el diseño
 - o Condiciones operacionales y medioambientales reales en la explotación del activo: número de arranques y paradas, consumos, resultados de los análisis realizados al equipo in situ, resultados de lecturas de variables físicas como temperatura y vibraciones, resultados de inspecciones visuales, medida de espesores, termografías, etc.
- Datos técnico-económicos para el cálculo del perfil de gasto de cada activo.
 - o Coste de inversión
 - o Costes anuales de O&M
 - o Costes futuros (mantenimientos mayores previstos)
 - o Costes anuales de modos de fallos

3.2 Análisis de Criticidad

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten jerarquizar los activos de una instalación en función de su importancia para la organización, identificando aquellos activos sobre los cuales es prioritario dirigir recursos (económicos, humanos y tecnológicos). Es decir, este análisis ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los activos, dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan [25]. Estas consecuencias son posteriormente usadas en el ACCV para determinar los costes por eventos potenciales de fallos como se puede ver en la Figura 10.

La metodología AC empleada en este modelo [1] es ampliamente utilizada en la actualidad por numerosas empresas industriales. Existen numerosos artículos en la literatura donde el lector puede profundizar en ella, tanto teóricamente como en casos prácticos. Véase [1], [24], [26], [27]. Es por ello que con el objeto de abarcar la parte más novedosa del modelo, se pase a comentar brevemente esta metodología.

El procedimiento utilizado se basa en el Método de Criticidad Total por Riesgo (CTR), el cual es un proceso de análisis semicuantitativo soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de una pérdida funcional por la severidad de esta. Para valorar la criticidad de cada activo se siguen los siguientes pasos [27]:

1. *Definir la instalación y su funcionalidad*: el objetivo es obtener una visión completa de la instalación en la que funciona el elemento analizado.
2. *Definir la función del sistema en el cuál se encuentra el activo bajo análisis*: analizar la función concreta del sistema dentro de la instalación.
3. *Definir la función del activo analizado y su contexto operativo*.
4. *Definir la pérdida funcional*: una vez definida la función del activo, es fácil suponer que existe una pérdida funcional. No se analiza el hipotético modo de fallo sino las consecuencias de una pérdida funcional independientemente de la causa del fallo.
5. *Analizar las consecuencias del fallo*: se evalúa las consecuencias de una hipotética pérdida funcional. Para ello se utiliza una tabla de consecuencias, la cual se ha establecido por consenso y de acuerdo con grupos de expertos de la organización, donde se resumen los criterios para evaluar cada factor (por ejemplo: Seguridad Industrial, Medioambiente, Calidad de Servicio, Disponibilidad y Coste de Mantenimiento) y escalas (por ejemplo: Catastrófico, Muy Alto, Medio, Bajo).
6. *Determinar la severidad de una pérdida funcional*: cada criterio de consecuencia tiene un valor numérico que refleja la importancia de las consecuencias para la organización. Los valores numéricos se combinan para obtener un valor de severidad final.
7. *Determinar la frecuencia de fallo*: calcular la frecuencia de fallo de cada elemento para obtener el segundo parámetro necesario para la estimación de la criticidad.
8. *Calcular el nivel de criticidad*: multiplicar la frecuencia de fallo por el nivel de severidad, ambos calculados en los pasos anteriores.

Finalmente cada activo analizado se sitúa en una Matriz de Criticidad como la mostrada en la Figura 11. El eje X representa la severidad de la pérdida funcional del activo y el eje Y la frecuencia de fallo del mismo. Mediante esta representación gráfica, el gestor dispone de una base sobre la cuál dar comienzo cualquier proceso de optimización.

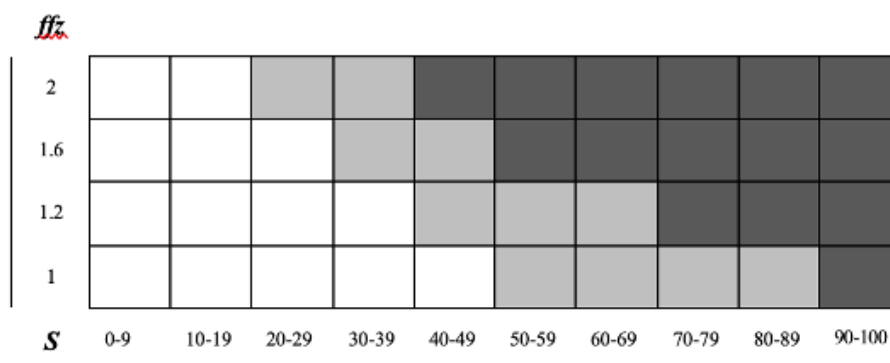


Figura 11. Ejemplo de Matriz de Criticidad.

3.3 Metodología de Índice de Salud de Activos

La metodología utilizada en el presente trabajo es una adaptación de la metodología de índices de activos de red comunes DNO del Reino Unido comentada en el capítulo 2.

Esta metodología tiene por objeto medir la condición general del activo a lo largo de su vida útil, la cual es variable como consecuencia del deterioro y del envejecimiento del activo. El indicador que mide esta condición es llamado Índice de Salud de Activos (AHI), siendo este por tanto una puntuación de activo diseñada para caracterizar la condición del activo y por tanto su rendimiento en términos de cumplimiento de la función establecida por la organización. Es importante resaltar que las condiciones reales de explotación del activo son tenidas en cuenta durante todo el análisis. La metodología propone además una relación entre las tasas de fallos del activo y el AHI, que permite que estas tasas pueden ser estimadas obteniéndose una evolución de las mismas durante todo el ciclo de vida del activo.

Como se observa en la Figura 10, este bloque de “Metodología AHI” se divide en tres pasos. En un primer paso, se calcula la evolución del índice de salud del activo hasta el momento del análisis (PHI_t). En un segundo paso y teniendo en cuenta el comportamiento del índice calculado en el paso anterior se proyecta el índice a lo largo de la vida útil del activo (FHI_t). Una vez se tiene el comportamiento completo del AHI durante el ciclo de vida del activo, pasado, presente y futuro (AHI_t), se estiman las tasas de fallos, las cuales son función del AHI_t .

3.3.1 Índice de salud del activo hasta el momento del análisis (PHI_t)

Este paso permite conocer la evolución de la condición del estado general del activo desde su puesta en marcha (t_{pm}) hasta el instante en el que se realiza el análisis (t_a), teniendo en cuenta las condiciones reales de explotación del activo. El cálculo del índice se realiza en puntos discretos de este intervalo de tiempo $[t_{pm}, t_a]$ siguiendo tres pasos o bloques según el diagrama de flujo de la Figura 12. Se pasa a continuación a describir cada uno de estos bloques: bloque estadístico, bloque de degradación y bloque de condición.

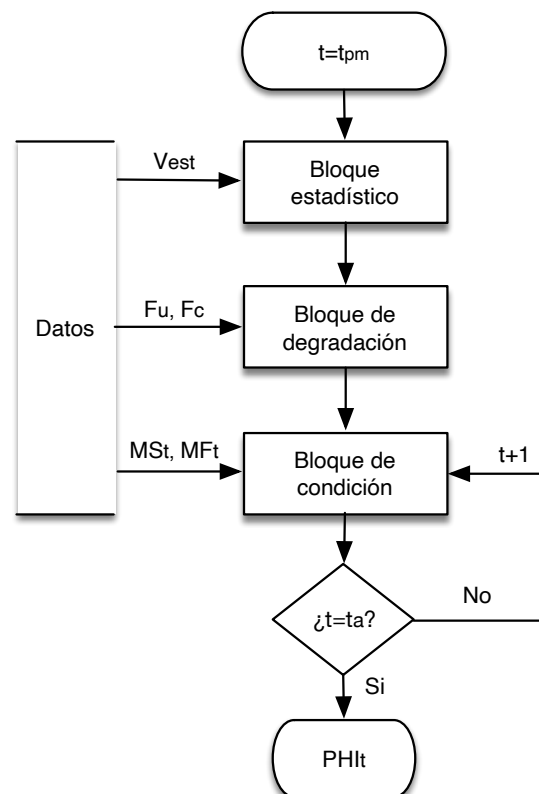


Figura 12. Diagrama de flujo cálculo PHI_t

3.3.1.1 Bloque estadístico

Este bloque permite conocer el comportamiento del índice de salud considerando que el activo estuviese trabajando bajo unas condiciones ideales de explotación, es decir las condiciones estándar consideradas por el fabricante. Esta evolución ideal del AHI se puede utilizar posteriormente para ser comparada con el comportamiento del índice de salud cuando se tienen en cuenta las condiciones reales de explotación del activo, de manera que el gestor de mantenimiento puede hacerse una idea del nivel de deterioro sufrido por el activo al ser explotado este en una ubicación específica y en unas condiciones de operación concretas. Esto le permitirá además comparar mismos equipos explotados en diferentes condiciones y tomar decisiones con el objeto de aumentar la vida útil de estos.

Para caracterizar el comportamiento del AHI en este bloque, se define la tasa de envejecimiento del bloque estadístico, β^{Est} , la cual representa la velocidad con la que el activo se deteriora teniendo en cuenta que las condiciones de explotación del equipo son las estándar dadas por el fabricante. Esta es calculada mediante la expresión (23).

$$\beta^{Est} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{HI_{mm}}{HI_n} \right]}{V_e^{Est}} \quad (23)$$

donde

- HI_n es el valor dado al índice de salud cuando el activo es totalmente nuevo o se le acaba de realizar un overhaul. Siguiendo la DNO este valor es igual a 0.5.
- HI_{mm} es el valor dado al índice de salud cuando el activo requiere un mantenimiento mayor u overhaul. Siguiendo la DNO este valor es 5.5.
- V_e^{Est} vida estimada del bloque estadístico, tiempo que el fabricante dice que transcurre hasta que es necesario realizar un overhaul.

Partiendo de la hipótesis fundamental que el comportamiento del envejecimiento del activo es de tipo exponencial [2], el índice de salud del activo teniendo en cuenta condiciones estándar HI_t^{Est} es calculado mediante la expresión (24).

$$HI_t^{Est} = HI_n \cdot e^{\beta^{Est} \cdot t} \quad (24)$$

donde

- t : tiempo. Para un activo estático (contenedores, tanques, intercambiadores, postes, estructuras, etc.) corresponde con su edad y para activos dinámicos (bombas, compresores, sopladores, etc.) corresponde con las horas de funcionamiento. La razón es que el funcionamiento envejece más que el paso del tiempo y por tanto, ofrece una mejor referencia para medir y comparar la salud del activo [28].

En la Figura 13, se representa el comportamiento del índice de salud de un activo genérico obtenido en el bloque estadístico. Como puede observarse, el índice comienza con un valor de 0.5 y evoluciona hasta 10. Cuando $HI_t^{Est}=5.5$, el activo alcanza la vida estimada dada por el fabricante.

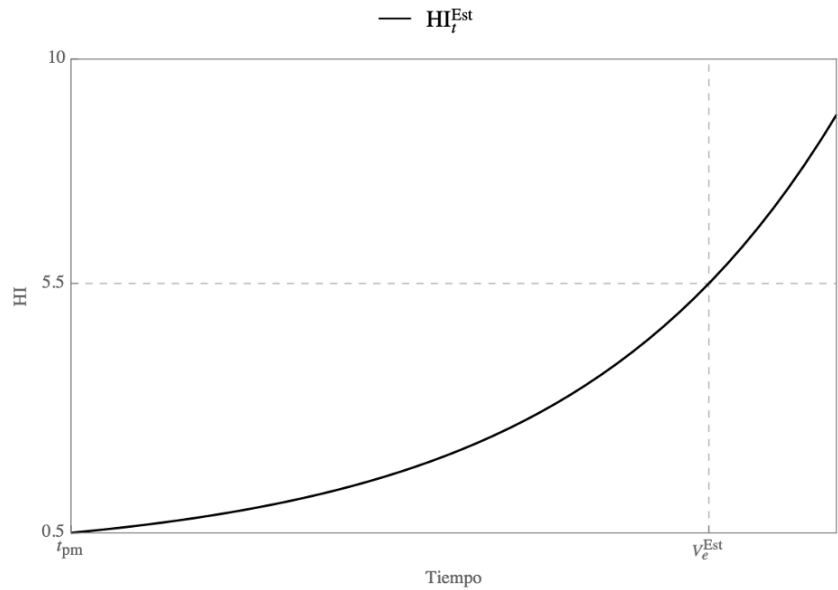


Figura 13. Bloque estadístico. HI bajo condiciones ideales.

3.3.1.2 Bloque de degradación

Al tener en cuenta las condiciones reales de explotación del activo, es de esperar que el comportamiento del HI expuesto anteriormente varíe. En este bloque, la vida estimada del bloque estadístico es ajustada en función de las características inherentes a la ubicación técnica. Este nuevo parámetro es llamado vida estimada del bloque degradación (V_e^{Deg}) y es calculado mediante la ecuación (25).

$$V_e^{Deg} = \frac{V_e^{Est}}{F_u \cdot F_C} \quad (25)$$

donde

- F_u : factor ubicación. Los factores de ubicación específicos y sus respectivos valores son los propuestos por la metodología de los grupos GB DNO [2] y deben adaptarse en función del sector específico y del activo concreto. A modo de ejemplo, algunos de estos factores podrían ser: distancia a la costa (F_{DC}), altitud sobre el nivel del mar (F_A), media anual de temperatura exterior (F_T), exposición a agentes atmosféricos corrosivos (F_{AT}), exposición a polvo en suspensión (F_{PS}). Teniendo en cuenta estos factores específicos, el factor de ubicación F_u se calcula según la expresión (26).
- F_C : factor carga. Mide la solicitud de carga en el punto de garantía (C_{pg}) frente a su carga máxima admisible (C_{max}). Es calculado mediante la expresión (27).

$$F_u = \max(F_{DC}, F_A, F_T, F_{AT}, F_{PS}) \quad (26)$$

$$F_C = \frac{C_{pg}}{C_{max}} \quad (27)$$

Una vez ajustada la vida estimada del bloque estadístico mediante los factores de ubicación y carga, la tasa de envejecimiento del bloque degradación β^{Deg} es definida mediante la expresión (28).

$$\beta^{Deg} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{HI_{mm}}{HI_n} \right]}{V_e^{Deg}} \quad (28)$$

El comportamiento del índice de salud teniendo en cuenta las características inherentes a la ubicación técnica del activo HI_t^{Deg} , se calcula mediante la expresión (29). En la Figura 14, se representa este comportamiento para un caso concreto en el que tanto F_u y F_c son mayores que la unidad. Al compararse este comportamiento con el ideal calculado en el bloque estadístico, se observa que la velocidad de degradación del activo es mayor en el bloque degradación. Por tanto, en este caso concreto, al considerar las características inherentes a la ubicación técnica se comprueba que la evolución del estado general de la condición del activo es peor del que se esperaba, provocando que la vida útil del activo se vea reducida.

$$HI_t^{Deg} = HI_n \cdot e^{\beta_t \cdot t} \quad (29)$$

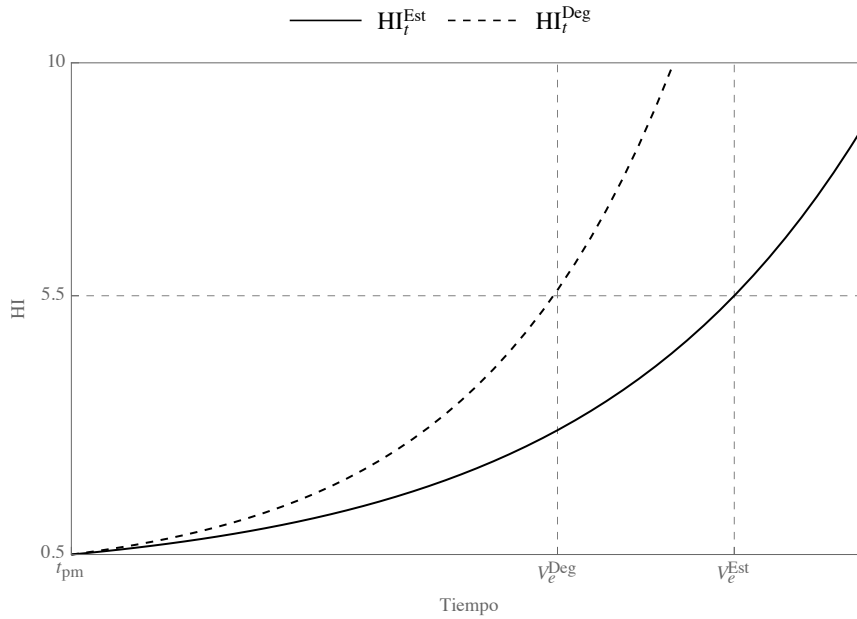


Figura 14. Bloque degradación. HI considerando F_u y F_c mayores que la unidad.

3.3.1.3 Bloque de condición

En este bloque, el índice de salud calculado tras el bloque degradación es ajustado en función de la condición del activo, las condiciones de operación y las condiciones de fiabilidad en el momento de la evaluación. Este ajuste se realiza mediante el modificador de salud MS_t y el modificador de fiabilidad MF_t , los cuales son calculados, para cada instante de tiempo, según las ecuaciones (30) y (31) respectivamente.

$$MS_t = \prod_{j=1}^{j=m} MS_{j_t} \quad (30)$$

$$MF_t = \prod_{k=1}^{k=n} MF_{k_t} \quad (31)$$

donde

- $j = 1 \dots m, k=1 \dots n$: índices utilizado para los diferentes modificadores de salud y fiabilidad respectivamente
- MS_{j_t} : modificador de salud j en el instante t .
- MF_{k_t} : modificador de fiabilidad k en el instante t .

Los modificadores de salud (MS) son parámetros que contienen información adicional sobre la salud actual del activo, los cuales están relacionados con la carga actual, el estado del activo (resultado de las inspecciones y comprobaciones realizadas sobre el mismo), y el funcionamiento (resultado de las capturas realizadas de las variables operativas del activo). Como ejemplos de modificadores de salud se citan los siguientes:

- Resultados de análisis y pruebas realizadas a los equipos: análisis de aceite, pruebas de aislamiento, endoscopias, etc.
- Medidas de variables físicas continuas, como la medición de vibraciones, etc.
- Análisis de datos de funcionamiento durante un período seleccionado: caudal, velocidad de rotación, temperatura de funcionamiento, carga del equipo, etc.

Los modificadores de fiabilidad (MF) se aplican a los activos cuya fiabilidad puede diferir significativamente dentro de la misma categoría. Pueden estar asociados a:

- La marca del fabricante y el tipo o modelo de activo.
- La construcción e integridad del activo, el material, etc.
- Los tratamientos superficiales aplicados.
- El número de revisiones y grandes mantenimientos realizados en el equipo.
- Las horas de inactividad del equipo.

El índice de salud calculado en el bloque degradación es ajustado según la ecuación (32), donde los modificadores de salud y fiabilidad aparecen como términos multiplicadores.

$$HI_t^{Cond} = HI_n \cdot e^{\beta_t \cdot t} \cdot MS_t \cdot MF_t \quad (32)$$

En la

Figura 15, se representa gráficamente el comportamiento del índice de salud calculado en los tres bloques expuestos, en un instante t_1 y para un caso concreto en el que $F_u, F_c, MS_{t_1}, MF_{t_1}$ son mayores que la unidad.

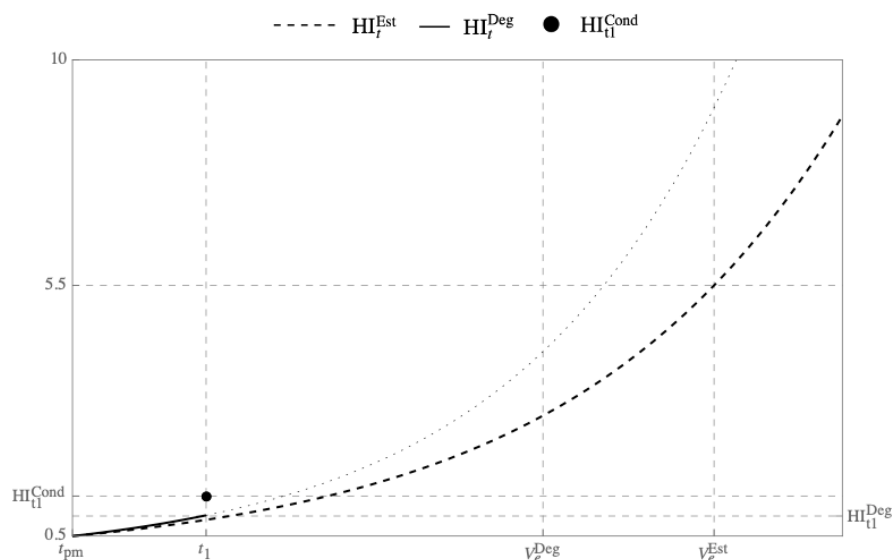


Figura 15. Bloque de condición. HI teniendo en cuenta la condición del activo, las condiciones de operación y las condiciones de fiabilidad.

En este caso concreto al ser MS_{t_1}, MF_{t_1} mayores que la unidad, $HI_{t_1}^{Cond}$ es mayor que $HI_{t_1}^{Est}$, de manera que se puede concluir que al considerar las condiciones reales de explotación del activo (características inherentes a la ubicación técnica y condiciones de operación y fiabilidad) el estado general de la condición del activo en este caso específico es peor del que se esperaba en este instante de tiempo t_1 .

El punto $HI_{t_1}^{Cond}$ es el primer punto calculado del intervalo $[t_{pm}, t_a]$, siendo este igual a PHI_{t_1} . Para calcular los siguientes puntos del PHI_t se repite este último bloque condición como indica la Figura 12, recalculando los modificadores de salud y fiabilidad para cada instante evaluado.

Un ejemplo gráfico del proceso de análisis hasta evaluar el instante t_a , puede verse en la Figura 18. En un análisis real sería conveniente evaluar el mayor número posible de instantes de tiempo, sin embargo, en este ejemplo se evalúan simplemente tres de ellos (t_1, t_2, t_a). Cada fila de gráficas de la Figura 18, corresponde con las gráficas obtenidas tras evaluar un instante de tiempo. Representándose en las gráficas de la primera columna (a, b y c) el comportamiento del AHI obtenido en cada bloque ($HI_t^{Est}, HI_t^{Deg}, HI_t^{Cond}$) y en las gráficas de la segunda columna (d, e y f), los PHI_t calculados hasta ese instante de análisis. En $t_2, MS_{t_2}, MF_{t_2}=1$, de manera que $HI_{t_2}^{Cond}$ coincide con $HI_{t_2}^{Deg}$ y en el instante t_a, MS_{t_a}, MF_{t_a} son nuevamente mayores que la unidad, de manera que el valor de $HI_{t_a}^{Cond}$ es mayor $HI_{t_a}^{Est}$, concluyendo que en el instante actual al ser considerado las verdaderas condiciones de explotación del activo, este posee un estado general de condición peor del que se esperaría al tener en cuenta la información estándar facilitada por el fabricante. Si el activo del ejemplo sigue expuesto a estas condiciones de explotación, su vida útil se verá reducida y será necesario realizarle un mantenimiento mayor antes de lo esperado o sus niveles de fiabilidad se descontrolarán.

3.3.2 Proyección del índice de salud del activo (FHI_t)

Una vez calculado PHI_t hasta el instante del análisis t_a , el método sugiere que el índice de salud puede ser proyectado hacia el futuro (FHI_t) de forma continua desde este instante t_a . La metodología propone hacerlo evaluando una tasa de envejecimiento corregida del activo β_c , la cual es calculada mediante la expresión (33). La proyección del índice de salud desde el instante t_a es calculada según la expresión (34).

$$\beta_c = \frac{\text{Ln} \frac{PHI_{t_a}}{HI_n}}{t_a} \quad (33)$$

$$FHI_t = HI_n e^{\beta_c t} \quad (34)$$

Siguiendo con el ejemplo genérico del apartado anterior, se muestra en la Figura 16, la proyección del índice desde t_a . Se observa que si se mantienen las frecuencias de los mantenimientos mayores dadas por el fabricante, es decir, cuando el instante de realizar el mantenimiento mayor t_{mm} coincide con la vida estimada dada por el fabricante, el índice de salud del activo en este ejemplo genérico alcanza un valor de 10 (máximo valor del AHI).

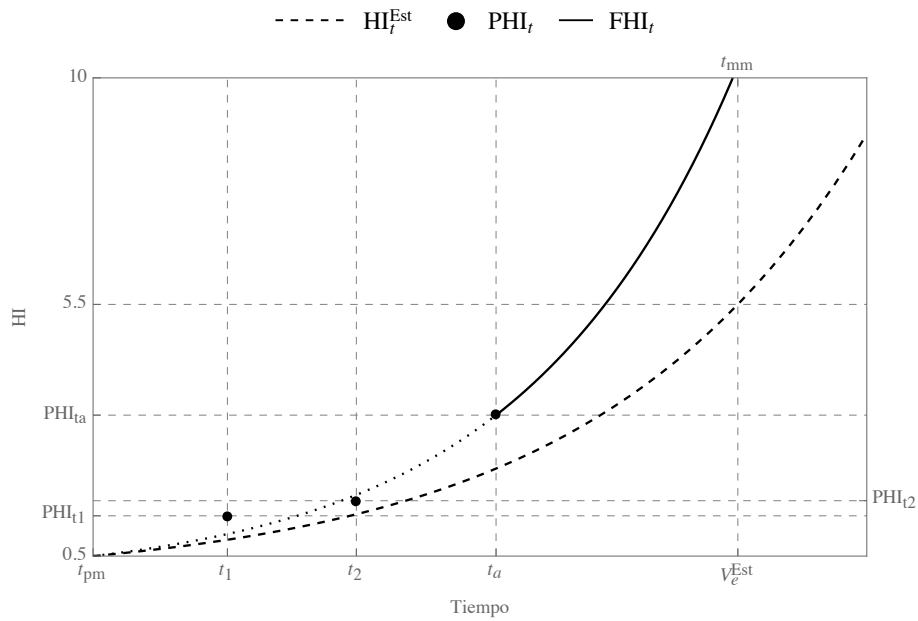


Figura 16. $FHI(t)$. Ejemplo genérico.

El comportamiento obtenido a partir de la ecuación (34), considerando las frecuencias de los mantenimientos mayores dadas por el fabricante, puede ser replicado para proyectar el índice de salud durante todo el ciclo de vida del activo. Véase Figura 17.

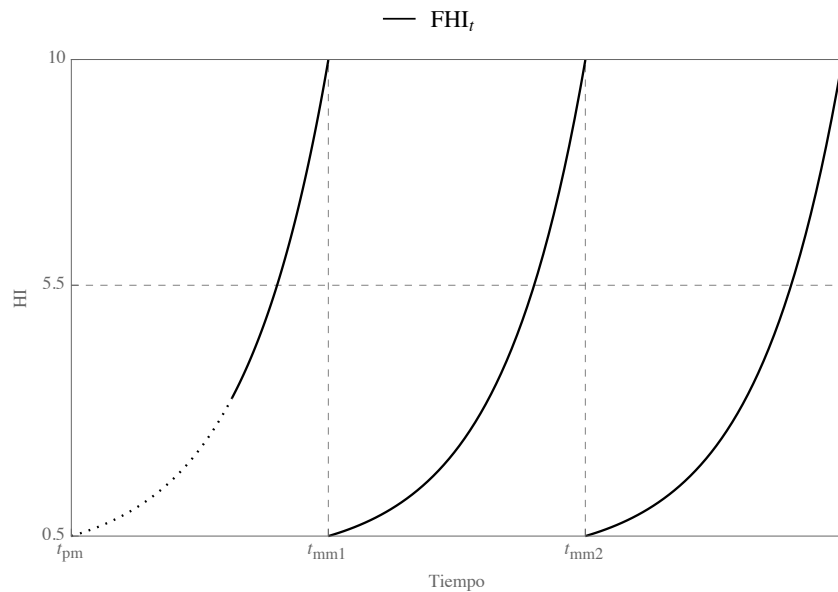


Figura 17. $FHI(t)$ ciclo de vida teniendo en cuenta las frecuencias de los mantenimientos mayores dados por el fabricante.

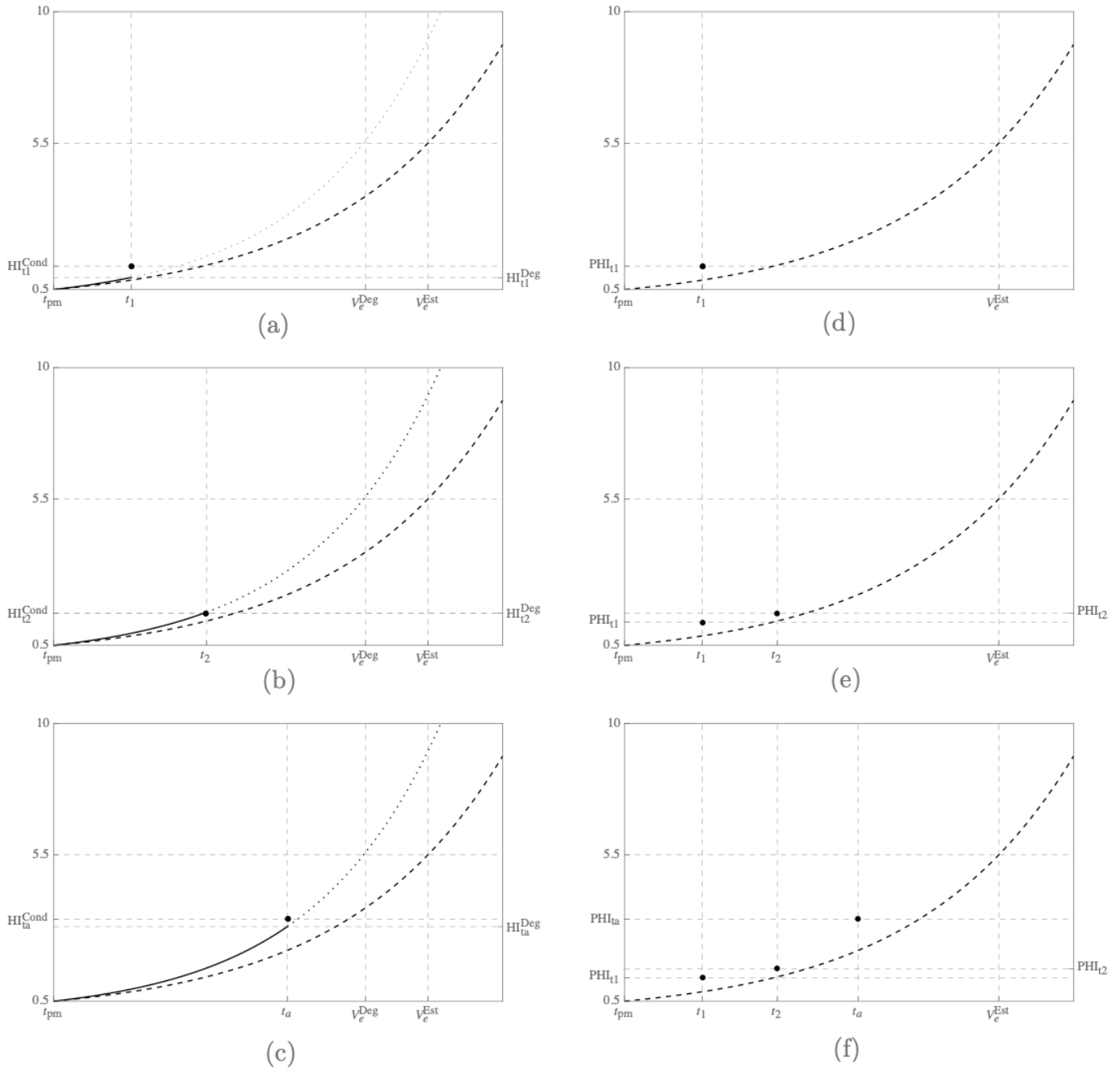


Figura 18. Cálculo gráfico PHI_t . Ejemplo genérico. $F_u=1.15, F_c=1.05$

(a) $t=t_1, MS_{t1}=1.15, MF_{t1}=1.1$ (b) $t=t_2, MS_{t2}=1, MF_{t2}=1$

(c) $t=t_3, MS_{t3}=1.05, MF_{t3}=1.05$

3.3.3 Estimación de la tasas de fallos

En este apartado se relaciona matemáticamente el estado de salud del activo (AHI) con su tasa de fallo (PoF). Esta vinculación la metodología DNO la realiza mediante los tres primeros términos de la serie de Taylor para la función exponencial, tal como aparece en la ecuación (35).

$$PoF_t = K \left[1 + (C \cdot H_t) + \frac{(C \cdot H_t)^2}{2!} + \frac{(C \cdot H_t)^3}{3!} \right] = K \cdot F_M \quad (35)$$

donde:

PoF_t probabilidad de fallo estimada dada la situación actual del activo.

K tasa de fallo estándar del modo de fallo.

C constante que representa un valor donde la probabilidad de fallo del activo en la peor condición es 10 veces superior a la probabilidad de fallo del activo como nuevo.

H_t $H=AHI_t$ si $AHI_t > 4$

$H=4$ si $AHI_t \leq 4$

F_M Factor multiplicador

La razón de esta formulación es que esta implementación es capaz de describir una situación en la que la probabilidad de fallo aumenta más rápidamente a medida que la salud del activo se degrada, pero a un ritmo más controlado que el que describiría una función exponencial completa [2].

Utilizando esta formulación, se representa en la Figura 19 la relación entre la probabilidad de fallo y el índice de salud del activo. Siguiendo con el ejemplo anterior y observando esta gráfica se puede afirmar que si se mantienen las frecuencias de los mantenimientos mayores dadas por el fabricante, el activo alcanza tasas de fallos con un valor de diez veces la estándar.

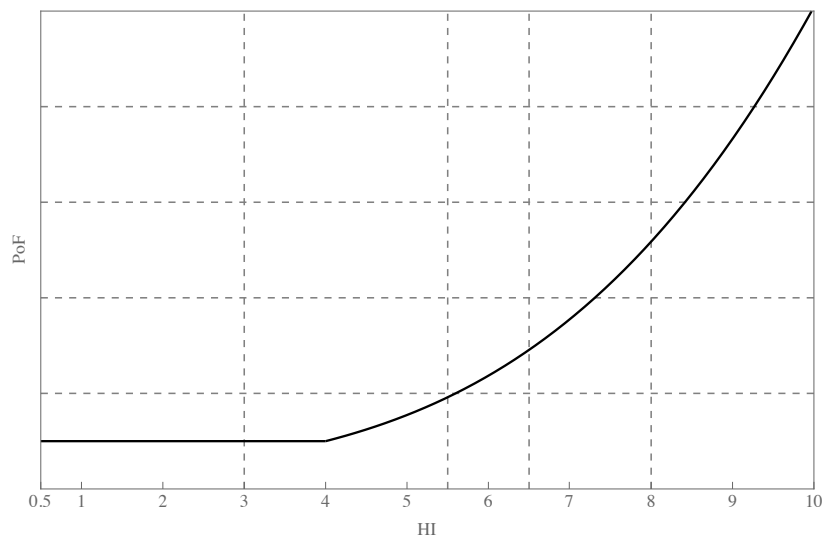


Figura 19. Gráfica PoF vs HI.

3.4 Análisis del Coste de Ciclo de Vida

El enfoque fundamental del cálculo de coste de ciclo de vida aplicado en este trabajo se basa en la formulación del modelo de Woodward [11], [12]. Este modelo, en resumen, propone el siguiente procedimiento: identificación de los tipos de fallos (críticos), determinación de los principales elementos de coste, estimación de las frecuencias de ocurrencia de los modos de fallo críticos y cálculo y expresión de la suma de todos los costes en valor presente. La ecuación de los costes de ciclo de vida de un activo físico viene dada por la expresión (36).

$$CTCV_P = \sum_{t=1}^T [CI_P + CO_P + CMP_P + CTPF_P + CMM_P] \quad (36)$$

donde

$CTCV_P$ Costes totales de ciclo de vida en valor presente, para una tasa de descuento (i) y un periodo de vida útil esperado (T).

CI_P Coste inicial de adquisición e instalación en valor presente.

CO_P Costes operacionales en valor presente (normalmente dado como valor anualizado).

CMP_P Costes de mantenimiento preventivo en valor presente (normalmente dado como valor anualizado).

$CTPF_P$ Costes totales por fiabilidad en valor presente (normalmente dado como valor anualizado) (se asume tasa de fallos constante, por lo cual el impacto en costes es el mismo en todos los años).

CMM_P Costes de mantenimiento mayor en valor presente.

T Periodo de tiempo en años.

Para actualizar cada sumando de la ecuación anterior a su valor presente se multiplica el tipo de coste por el factor de valor actual único $P_F(i, t)$ de la expresión (37).

$$P_F(i, t) = (1 + ir)^{t-1} \frac{1}{(1 + i)^t} \quad (37)$$

donde

ir tasa de inflación (%/año).

i tasa de descuento (%).

Si se tienen en cuenta los costes desde el punto de vista financiero vistos en el capítulo 1, la ecuación (36) puede escribirse como la expresión (38).

$$TOTEX = CAPEX + OPEX \quad (38)$$

donde

$$CAPEX = CI_P + CMM_P \quad (39)$$

$$OPEX = CO_P + CMP_P + CTPF_P \quad (40)$$

En el cálculo de los costes totales por fiabilidad $CTPF_P$ es donde se introducen las tasas de fallos estimadas a través de la metodología AHI. La tasa de fallo estimadas PoF_j de cada modo de fallo j , obtenida mediante la expresión (35), es utilizada para calcular $CTPF_P$ como se muestra en la expresión (41).

$$CTPF_P = \sum_{j=1}^F [PoF_j \cdot C_{f_j}] P_F(i, t) \quad (41)$$

donde

F número de modos de fallos críticos del activo.

PoF_j probabilidad de fallo estimada del modo de fallo j .

C_{f_j} consecuencias económicas del modo de fallo j .

$P_F(i, t)$ factor de valor actual único.

A continuación, con el objeto de visualizar la vinculación entre las metodologías AHI Y ACCV se muestra un ejemplo, en el cual los tipos de costes son simplificados a CMM_p y $CTPF_p$ y donde se analiza un único modo de fallo del activo con una tasa de fallo λ y una consecuencia económica C_f .

Tomando la estrategia de realizar los mantenimientos mayores en las frecuencias facilitadas por el fabricante, el comportamiento del índice de salud es el mostrado en la Figura 20. En la gráfica de la izquierda, una vez calculado PHI_{t_a} , el índice de salud es proyectado hasta alcanzar la vida estimada dada por el fabricante, instante en el que el índice alcanza un valor de 10 y es sometido a un mantenimiento mayor. En la gráfica de la derecha, el comportamiento a futuro del índice es replicado ocho periodos, hasta el final de su vida útil. Durante ese intervalo de tiempo, el activo es sometido a dos mantenimientos mayores, alcanzando previamente valores muy altos de AHI y por tanto según la Figura 19, altos valores de tasas de fallos. Los niveles de fiabilidad del activo aplicando esta estrategia de mantenimientos mayores son muy bajos, la frecuencia de fallos crece de forma incontrolada, haciéndolo también las necesidades de correctivos y sus costes o las necesidades de preventivos para mantener la fiabilidad dentro del rango deseado, multiplicando con todo ello los costes por mantenimiento.

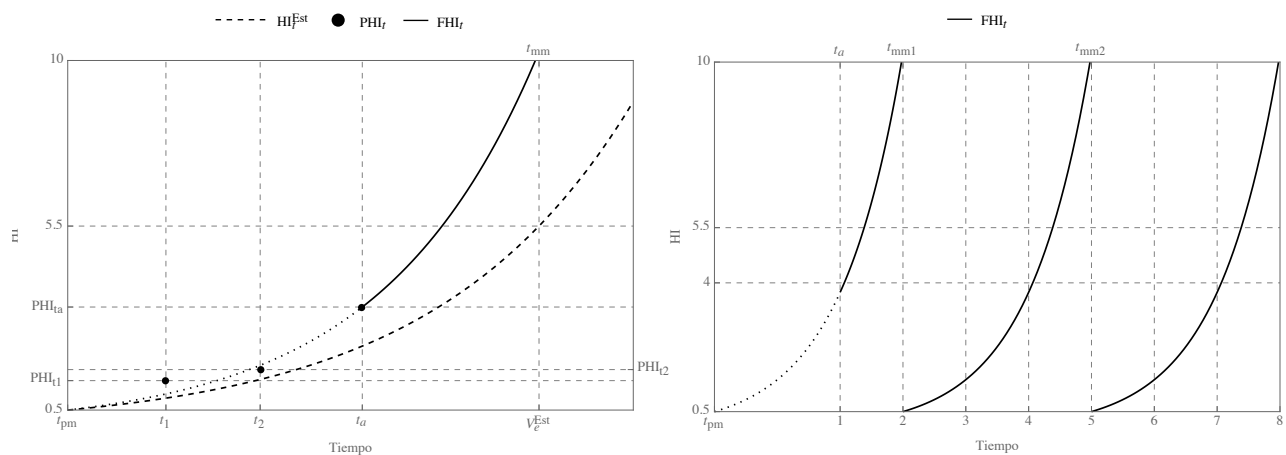


Figura 20. Comportamiento AHI. Estrategia 1.

En la Tabla 4, se resumen los costes soportados al aplicar la estrategia 1: frecuencias de mantenimientos mayores dadas por el fabricante. Se evalúa cada intervalo de tiempo tomando el valor más alto de HI alcanzado en dicho intervalo. Mediante la expresión (35), se obtiene la tasa de fallo para el HI evaluado. El CTPF es calculado mediante la expresión (41) y aplicando esta estrategia, dos costes de overhaul C_{ov} son soportados. El TOTEX alcanzado con esta estrategia es de $34\lambda C_f + 2C_{ov}$.

Tabla 4. ACCV simplificado del ejemplo genérico. Estrategia 1.

EST1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	TOTAL
HI	10	<4	<4	10	<4	<4	10	-
POF	10λ	λ	λ	10λ	λ	λ	10λ	-
CTPF	$10\lambda C_f$	λC_f	λC_f	$10\lambda C_f$	λC_f	λC_f	$10\lambda C_f$	$34\lambda C_f$
CMM	C_{ov}	-	-	C_{ov}	-	-	-	$2C_{ov}$
TOTEX	$10\lambda C_f$	λC_f	λC_f	$10\lambda C_f$	λC_f	λC_f	$10\lambda C_f$	$34\lambda C_f + 2C_{ov}$

3.5 Análisis de estrategias

Con objeto de mantener las probabilidades de fallo dentro de un rango aceptable, se llevan a cabo mantenimientos preventivos y con periodicidades comparativamente mucho más largas se realizan mantenimientos mayores, después de los cuales el activo correspondiente queda prácticamente en situación de “como nuevo”.

Para un activo debidamente mantenido (correctivos y preventivos), se puede considerar que sus tasas de fallo se mantienen dentro de los valores esperados mientras el indicador de salud no sobrepase el valor $AHI=4$, evolucionando al alza, de una forma todavía controlada hasta el valor de $AHI=5.5$, punto a partir del cual la probabilidad de fallo comienza a aumentar de forma exponencial. Véase Figura 19.

De esta manera, llevando a cabo los mantenimientos mayores cuando $AHI=5.5$, las tasas de fallo se mantendrían en el rango controlado y esperado para los planes de mantenimiento establecidos. De dilatar este intervalo de tiempo hasta alcanzar la vida estimada dada por el fabricante (estrategia 1), la frecuencia de los fallos crecería de forma incontrolada y, por ende, las necesidades de correctivos y sus costes o las necesidades de preventivos para mantener la fiabilidad dentro del rango deseado, multiplicando con todo ello los costes por mantenimiento.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se pueden ir diseñando diferentes estrategias de mantenimientos mayores con el objeto de alcanzar aquella que garantice la mayor fiabilidad del activo y el menor coste total (TOTEX) de ciclo de vida.

La estrategia aplicada para el ejemplo (estrategia 2) sería aquella en la que el mantenimiento mayor se lleva a cabo en el instante que el activo alcanza un valor de AHI igual a 5.5, como puede verse en la Figura 21. Al igual que antes, el índice es proyectado ocho periodos de tiempo, de manera que durante el ciclo de vida del activo, este es sometido a tres mantenimientos mayores en vez de dos como era el caso de la estrategia 1. Bajo esta estrategia, el activo se encuentra bajo unos niveles de fiabilidad mucho más altos que aplicando la estrategia 1.

En la

Tabla 5, se resumen los costes soportados al aplicar la estrategia 2: mantenimiento mayor al alcanzar $AHI=5.5$. El TOTEX alcanzado mediante esta estrategia es de $10\lambda C_f + 3C_{ov}$.

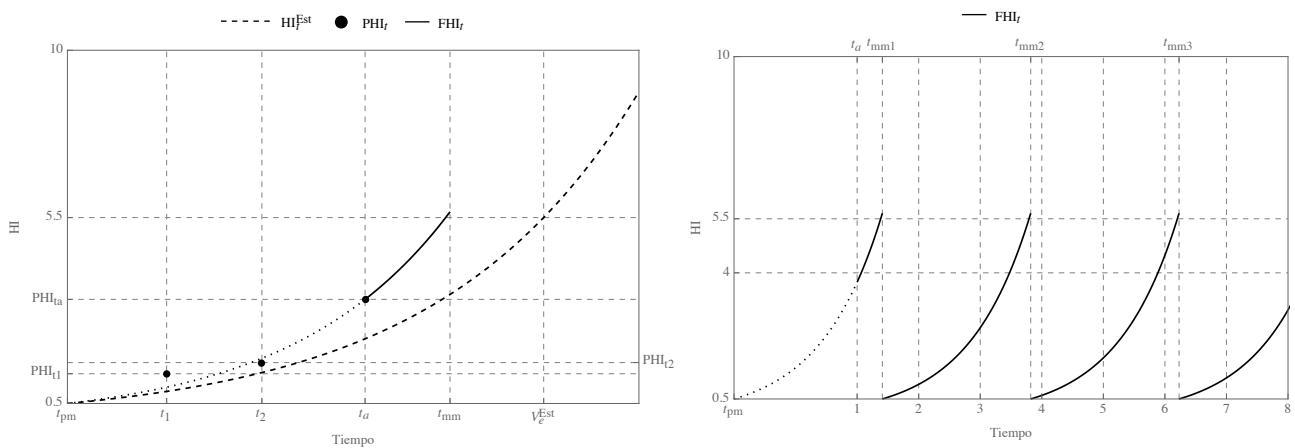


Figura 21. Comportamiento AHI. Estrategia 2.

Tabla 5. ACCV simplificado del ejemplo genérico. Estrategia 2.

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	TOTAL
HI	5.5	<4	5.5	<4	<4	5.5	<4	-
POF	2λ	λ	2λ	λ	λ	2λ	λ	-
CTPF	$2\lambda C_f$	λC_f	$2\lambda C_f$	λC_f	λC_f	$2\lambda C_f$	λC_f	$10\lambda C_f$
CMM	C_{ov}	-	C_{ov}	-	-	C_{ov}	-	$3C_{ov}$
TOTEX	$2\lambda C_f$	λC_f	$2\lambda C_f$	λC_f	λC_f	$2\lambda C_f$	λC_f	$10\lambda C_f + 3C_{ov}$

3.6 Comparativa de estrategias

Con el objeto de cuantificar y poder comparar las estrategias comentadas en los ejemplos anteriores, se consideran los datos de un activo genérico dados en la

Tabla 6. Introduciendo estos valores en la Tabla 4 y

Tabla 5 se obtienen los costes financieros de ambas estrategias resumidos en la Tabla 7.

Se observa que al aplicar la estrategia 2, el TOTEX no se ve reducido, supone un sobrecoste con respecto la estrategia 1 de mil euros. Por tanto, aplicar esta estrategia de mantenimientos mayores no implica un ahorro económico. Sin embargo, la estrategia 2 supone un aumento considerable del nivel de fiabilidad del activo, de manera que se soportarían menos costes de correctivos y preventivos y se evitaría tener que aplicar un aumento de la frecuencias de análisis o alguna investigación más profunda del activo.

Mediante esta información, el gestor de mantenimiento podrá tomar la decisión más oportuna en cada caso de forma objetiva, siendo en base a este modelo justificable ante la dirección.

Se puede concluir que mediante el modelo planteado en el presente trabajo el gestor de mantenimiento posee una herramienta objetiva para aumentar la eficiencia del proceso de toma de decisiones relacionadas con el control de fallos, maximizando la rentabilidad de la organización y minimizando los riesgos operacionales (fiabilidad y disponibilidad) y financieros relacionados con el ciclo de vida de los activos.

Tabla 6. Datos fiabilidad y costes de un activo genérico.

	Valor	Unidad
λ	1	fallo/periodo
C_f	500	€
C_{ov}	13000	€

Tabla 7. Costes financieros por estrategia.

Estrategia	CAPEX (€)	OPEX (€)	TOTEX (€)
1	26000	17000	43000
2	39000	5000	44000

4 CASOS DE ESTUDIO

Para ilustrar el modelo propuesto, este es aplicado a 49 equipos de una terminal de recepción, almacenamiento y regasificación de Gas Natural Licuado (GNL). Este caso de estudio se enmarca dentro de un programa de beca realizado por el autor del documento con el Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas I, concretamente con el grupo de investigación, Sistemas Inteligentes de Mantenimiento. En este proyecto, el modelo planteado fue aplicado con el objeto de definir un plan de mantenimiento a largo plazo (2018-2035) y un perfil de gastos esperado asociado a dicho plan.

Una vez desarrollado el primer paso del modelo, análisis de criticidad, quince equipos fueron clasificados como críticos. Al no disponer la empresa de históricos e información referente a la salud actual de estos activos críticos (resultados de inspecciones y comprobaciones realizadas sobre los mismos, resultado de capturas realizadas de las variables operativas del activo, etc.), no fue posible definir un gran número de modificadores de salud y fiabilidad para estos equipos. Con la finalidad de enriquecer el caso de estudio, se decide analizar un activo que a pesar de no estar clasificado como crítico, se dispone de información sobre su condición y funcionamiento que permite definir diferentes modificadores de salud y fiabilidad.

Por tanto, el modelo es aplicado a un grupo motobomba de baja presión con el objeto de definir una estrategia de mantenimientos mayores para este equipo, durante los años 2018-2035. Esta estrategia deberá mantener controlados los niveles de fiabilidad del activo y reducir en lo máximo posible el gasto total (TOTEX) de ciclo vida del perfil de gasto asociado a dicha estrategia.

Este grupo motobomba tiene por finalidad bombear el GNL almacenado en los tanques hacia el equipo recondensador para posteriormente ser conducido a las bombas de alta presión. Los datos principales del equipo son resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos principales del grupo motobomba de baja presión

Tipo	criogénicas, centrifugas y sumergidas	
Vida estimada por el fabricante	20000 horas	
Carga en el punto de garantía	188.3 KW	
Carga máxima	220 KW	
Modos de fallos críticos	Tasa de fallos estándar(fallos/año)	Consecuencias económica (€/fallo)
Válvula automática	1	100
Instrumentación	1	2100
Cable alimentación	0	0
Válvulas parciales	0	0

Se pasa a desarrollar los diferentes pasos del modelo. Véase el diagrama de flujo de la Figura 10.

4.1 Análisis de Criticidad

Los factores y niveles contemplados en el análisis son los siguientes:

- *Frecuencia de fallo*: frecuencia promedio anual de pérdidas funcionales del elemento objeto de estudio. Sus niveles son: Muy alta (MA), Alta (A), Media (M), Baja (B).
- *Seguridad Industrial*: evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en: daño al personal de la instalación, propio o ajeno y daño en el valor de los activos industriales, de los productos y materiales usados en la producción. Sus niveles son: Catastrófico (CA), Muy Alto (MA), Medio (M), Bajo (B).
- *Medioambiente*: evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en el medioambiente, incluyendo los costes de recuperación de este, sanciones, indemnizaciones, etc. Sus niveles son: Catastrófico (CA), Muy Alto (MA), Medio (M), Bajo (B).
- *Calidad de servicio*: evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en las condiciones de prestación de los servicios de recepción y entrega del gas. Sus niveles son: Catastrófico (CA), Muy Alto (MA), Medio (M), Bajo (B).
- *Disponibilidad*: Este factor evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en la capacidad nominal de la instalación. Sus niveles son: Muy Alto, (MA) Alto (A), Medio (M), Bajo (B).
- *Coste de mantenimiento*: evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en los costes de mantenimiento correctivo del mismo, incluyendo todos los costes asociados a la recuperación del equipo. Sus niveles son: Muy Alto, (MA) Alto (A), Medio (M), Bajo (B).

Conocida las tasas de fallos promedio para cada grupo de elementos, se definen los niveles, su cuantificación y la escala propuesta para el factor frecuencia de fallo. Estos son recogidos en la Tabla 9.

Tabla 9. Escala para los niveles del factor frecuencia de fallo

Fallos/año	Clasificación	Escala
<4	Muy alto	2
2-4	Alto	1.6
1-2	Medio	1.2
>1	Bajo	1

Las ponderaciones entre los factores restantes, los criterios para evaluar cada uno de ellos y las escalas utilizadas en los cálculos, fueron establecidos por consenso y de acuerdo con un grupo de expertos de la empresa. Estos son resumidos en la tabla de consecuencias de la Figura 22.

Seguridad industrial: 38% CATASTROFICO: CA MUY ALTO: MA MEDIO: M BAJO: B		Medioambiente: 15% CATASTROFICO: CA MUY ALTO: MA MEDIO: M BAJO: B		Calidad de Servicio: 22 % CATASTROFICO: CA MUY ALTO: MA MEDIO: M BAJO: B		Disponibilidad: 20% MUY ALTO: MA ALTO: A MEDIO: M BAJO: B		Costos de Manto.: 5% MUY ALTO: MA ALTO: A MEDIO: M BAJO: B	
Efecto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable o con víctimas mortales o incapacidad permanente	CA 100	Efecto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable	CA 100	Impacto elevado en imagen de empresa o ausencia de servicio de manera inmediata	CA 100	Parada de instalación. Pérdida total de la capacidad nominal de la instalación por un tiempo > 12hrs.	MA 20	>40.000 USD	MA 5
Impacto alto en la instalación sofocado con medios exteriores o daños en exterior en zona no vulnerable; o lesión grave que provoca una incapacidad temporal prolongada	MA 38	Impacto alto en la instalación mitigado con medios exteriores o daños en exterior en zona no vulnerable	MA 15	Impacto medio en imagen y/o económico alto por reclamaciones contractuales, de más de 30.000 USD	MA 22	Disminución capacidad nominal superior al 50%.	A 10	Mayor o igual a 6.000 USD < C < 40.000 USD	A 4
Impacto alto en la instalación sofocado con medios propios; o lesión menor y reversible a Trabajadores	M 19	Impacto medio o bajo en la instalación mitigado con medios propios	M 5	Impacto bajo en imagen y/o económico por reclamaciones contractuales, de menos de 30000 USD	M 15	Pérdida de la redundancia o capacidad nominal inferior al 50%.	M 5	Costos 1000 USD < C < 6.000 USD	M 3
Impacto leve en la instalación sofocado con medios propios; o lesión leve que no afecta al desarrollo del trabajo. No impacto	B 1	No impacto	B 1	No impacto	B 1	No tiene impacto	B 1	Menos de 1.000 USD	B 1

Figura 22. Tabla de consecuencias caso de estudio.

Es importante resaltar que pueden existir casos de pérdidas funcionales de consecuencias inadmisibles para un determinado factor. En estos casos se asigna automáticamente un valor 100 a la consecuencia del fallo del elemento para ese factor, caracterizando directamente la pérdida funcional del elemento como de máxima severidad, independientemente de las posibles consecuencias para otros factores, y de la ponderación elegida para los mismos.

Como resultado de la aplicación de la metodología de Análisis de Criticidad a los 59 activos de la empresa, se obtuvo que 15 de ellos eran considerados críticos:

- Brazos, por condiciones inadmisibles en seguridad industrial.
- Islas, por condiciones inadmisibles en seguridad industrial.
- KO Drum del muelle, por condiciones inadmisibles en calidad de servicio.
- Recondensador, por condiciones inadmisibles en calidad de servicio.

Como se ha comentado anteriormente, se pasa a aplicar las metodologías AHI y ACCV al grupo motobomba de baja presión, que a pesar de estar clasificado con una criticidad baja tras el análisis, se dispone por parte de la empresa de la información necesaria para poder definir los diferentes modificadores de salud y fiabilidad.

4.2 Metodología de Índice de Salud de Activos

4.2.1 Índice de Salud del activo hasta el momento de análisis (2013-2017)

El equipo evaluado es puesto en marcha (t_{pm}) el primer trimestre del año 2013. En este momento, el equipo tiene una condición de nuevo por lo que su índice de salud en t_{pm} tiene un valor de 0.5. El análisis se llevó a cabo (t_a) a finales del cuarto trimestre del 2017, siendo la toma de datos realizada por trimestre. Al tratarse de un equipo dinámico, el tiempo de análisis considerado son las horas de funcionamiento, ya que como se vio en el capítulo 3, este es más representativo del envejecimiento de este tipo de activos.

Siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 12 se pasa a evaluar los bloques estadísticos, degradación y condición para el grupo motobomba de baja presión en el periodo de tiempo 2013-2017.

4.2.1.1 Bloque estadístico

Una vez calculada la tasa de envejecimiento de este bloque β^{Est} mediante la ecuación (23), el comportamiento del activo bajo estudio es calculado mediante la expresión (24), considerando “t” el tiempo de operación o funcionamiento acumulado en cada trimestre. Una representación de este comportamiento del índice de salud en este bloque, tanto numérico como gráfico, es representado en la Figura 23.

$$\beta^{Est} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{HI_{mm}}{HI_n} \right]}{V_e^{Est}} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{5.5}{0.5} \right]}{20000} = 0.00012$$

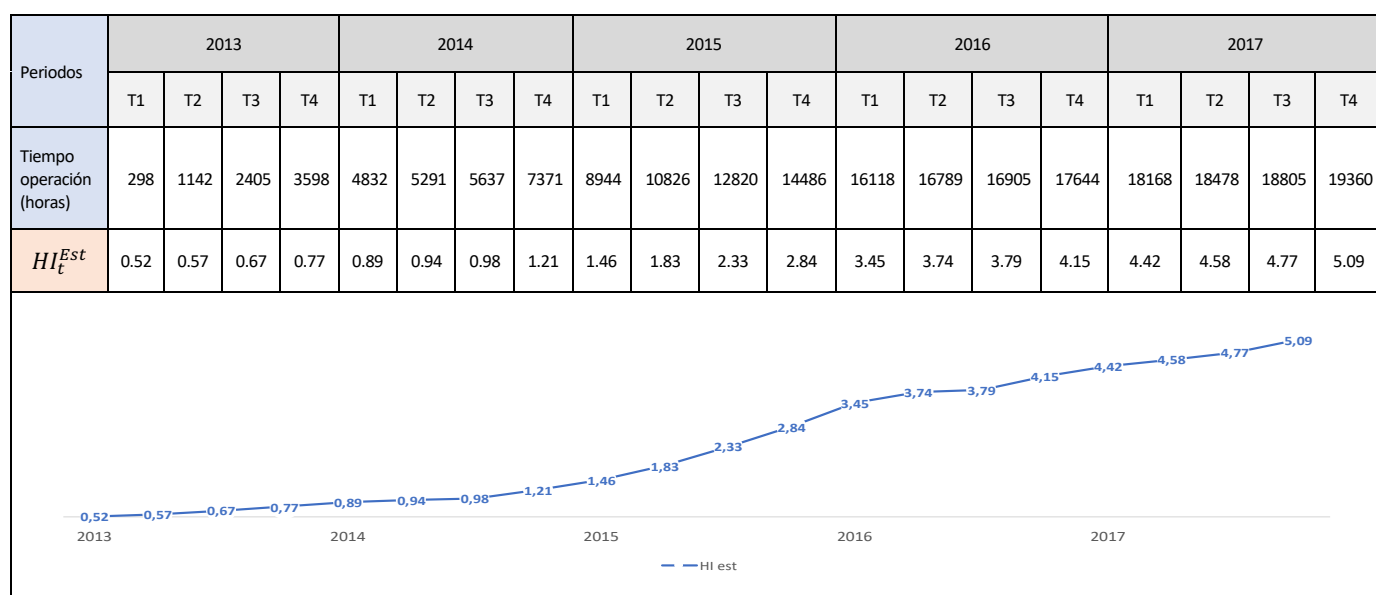


Figura 23. Bloque estadístico. Caso de estudio.

4.2.1.2 Bloque degradación

Se pasa a continuación a estimar el factor de ubicación F_u y el factor de carga F_c , los cuales son definidos teniendo en cuenta las características inherentes a la ubicación técnica del activo. Los factores de ubicación específicos considerados en el caso de estudio son: distancia a la costa (F_{DC}), altitud sobre el nivel del mar (F_A), media anual de temperatura exterior (F_T) y exposición a agentes atmosféricos corrosivos (F_{AT}). Los criterios de estos factores específicos son resumidos en las Tabla 10-6.

Tabla 10. Criterios y sus valores para el factor distancia a la costa.

Distancia a la costa (km)	F_{DC}
0 - 1	1.2
1 - 5	1.15
5 - 10	1.1
10-20	1.05
>20	1.0

Tabla 11. Criterios y sus valores para el factor altitud sobre el nivel del mar.

Altitud sobre el nivel del mar (m)	F_A
0 – 500	1.0
500 – 1000	1.1
1000 – 2000	1.2
>2000	1.3

Tabla 12. Criterios y sus valores para el factor media anual de temperatura exterior.

Media anual de temperatura exterior (°C)	F_T
0 – 10	1.0
10 – 20	1.05
20 – 30	1.1
>30	1.15

Tabla 13. Criterios y sus valores para el factor exposición a agentes atmosféricos corrosivos.

Exposición a agentes atmosféricos corrosivos	F_{AT}
No exposición	1.0
Exposición a un agente externo	1.05
Exposición a más de un agente externo	1.15

La planta se encuentra situada a unos cuatrocientos metros del nivel del mar, en una región que presenta una atmósfera altamente corrosiva, donde la temperatura media anual es de aproximadamente 20 °C. Concretamente, este equipo se encuentra siempre sumergido en el tanque de almacenamiento de GNL, de manera que según la norma DNO, a este tipo de equipos se le asigna directamente un valor $F_u=1$, sin tener en cuenta los factores definidos.

Por otro lado, el factor de carga se calcula mediante la ecuación (27), en función de la carga en el punto de garantía y la carga máxima admisible del equipo, siendo ambos datos recogidos en la Tabla 8.

$$F_c = \frac{\text{Carga en el punto de garantía}}{\text{Carga máxima}} = \frac{188.3}{220} = 0.86$$

Una vez se han calculado los factores que tienen en cuenta las características inherentes a la ubicación técnica del equipo, $F_u=1$ y $F_c=0.86$, la vida estimada del bloque de degradación V_e^{Deg} y la tasa de envejecimiento de este bloque β^{Deg} son calculadas mediante las expresiones (25) y (28) respectivamente.

$$V_e^{Deg} = \frac{V_e^{Est}}{F_u \cdot F_c} = \frac{20000}{1 \cdot 0.86} = 23256 \text{ horas}$$

$$\beta^{Deg} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{HI_{mm}}{HI_n} \right]}{V_e^{Deg}} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{5.5}{0.5} \right]}{19380} = 0.00010$$

El comportamiento del índice de salud según este bloque degradación HI_t^{Deg} es calculado mediante la ecuación (29). Una representación numérica y gráfica de este comportamiento es representado en la Figura 24. En dicha gráfica, se ha introducido el comportamiento del índice obtenido en el bloque estadístico HI_t^{Est} para poder ver el efecto de la degradación del equipo al tener en cuenta las características inherentes a la ubicación técnica. Como se puede observar, el estado de la condición del equipo durante el periodo 2013-2017 es más favorable del que se esperaba, alcanzando el índice de salud un valor, en el momento del análisis, de 3.68 en vez de 5.09 que es el obtenido al tener en cuenta las condiciones estándar dadas por el fabricante.

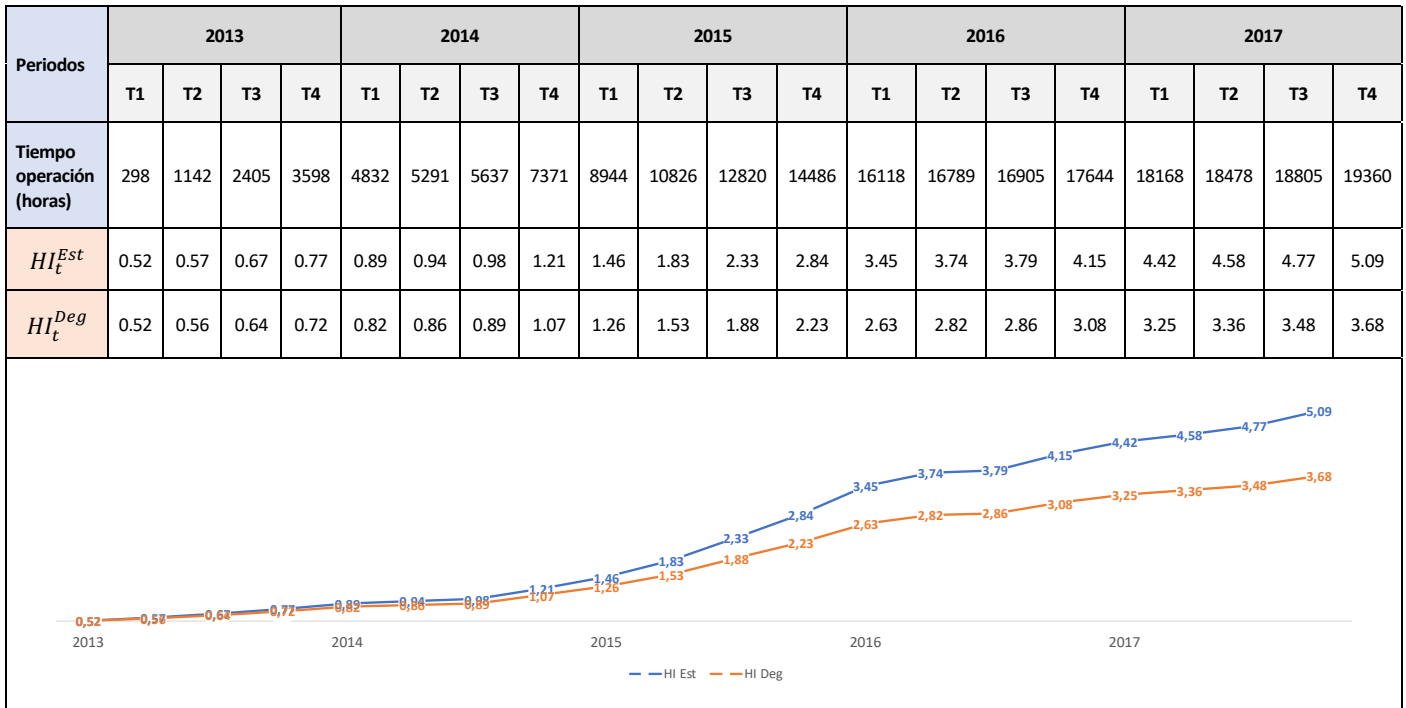


Figura 24. Bloque degradación. Caso de estudio.

4.2.1.3 Bloque condición

Los modificadores de salud (MS) elegidos para caracterizar la condición del equipo bajo estudio son: caudal, consumo eléctrico sobre la potencia nominal, temperatura de aspiración, vibraciones, y número de arranques desde el último mantenimiento mayor. Se pasa a continuación a comentar cada uno de ellos y a ejemplificar su cálculo, evaluando concretamente el trimestre 3 del año 2016.

4.2.1.3.1 Caudal

Tres escenarios son definidos considerando diferentes rangos de caudales. Estos y sus valores asignados para poder calcular el modificador de salud “Caudal” son recogidos en la Tabla 14.

Tabla 14. MS Caudal. Escenarios y valores asignados.

	Rango (m ³ /h)	<285	285-427	>427
Caudal				
	Modificador	1.4	1	1.3

Se parte de un histórico de caudales muy deficiente. Para cada fecha de la que se dispone de una toma de dato de esta variable, se calcula su escenario y el valor asociado según la Tabla 14. El modificador en el trimestre es calculado realizando el promedio de estos valores. En la Tabla 15, se resumen estos cálculos para el trimestre 3 del 2016.

Tabla 15. MS Caudal. Trimestre 3 del 2016.

Año	Trimestre	Fecha	Caudal (m³/h)	MS Caudal fecha dato	MS Caudal
2016	3	5/7/16	307.9	1	
		9/8/16	290.7	1	1.13
		5/9/16	259.2	1.4	

4.2.1.3.2 Consumo eléctrico sobre la potencia nominal

Cuatro escenarios son definidos considerando diferentes rangos de porcentaje de consumo eléctrico sobre la potencia nominal. Estos y sus valores asignados, para poder calcular el modificador de salud “Consumo eléctrico sobre la potencia nominal”, son recogidos en la Tabla 16.

Tabla 16. MS Consumo eléctrico sobre la potencia nominal. Escenarios y valores asignados.

	Rango(%)	100 - 120	80 - 100	60- 80	<60
Consumo eléctrico sobre la potencia nominal	Modificador	1.1	1	1.2	1.3

Se parte de un histórico de consumo eléctrico del motor, donde se determinan las horas de funcionamiento de este a una determinada potencia. A partir de estos datos y conociendo la potencia nominal del equipo dada en la Tabla 8, se calcula para cada trimestre, las horas de funcionamiento y el porcentaje de horas de funcionamiento con respecto el total de horas de funcionamiento en cada rango. El valor del modificador de salud en el trimestre corresponde con el sumatorio de todos los productos entre el porcentaje de horas de funcionamiento en cada rango por el valor del modificador asignado a dicho rango. En la Tabla 17, se resumen estos datos para el trimestre 3 del año 2016.

Tabla 17. MS Consumo eléctrico sobre la potencia nominal. Trimestre 3 del año 2016.

<i>Año</i>	<i>Trimestre</i>	<i>Rango (%)</i>	<i>Horas operación</i>	<i>h oper. h totales</i>	<i>MS KW rango</i>	<i>MS KW</i>
2016	3	>100	195.92	12.67%	1.1	1.02
		80-100	1295.78	83.78%	1	
		60-80	54.78	3.54%	1.2	
		≤60	0.22	0.01%	1.3	

4.2.1.3.3 Temperatura de aspiración (T_{asp})

Tres escenarios son definidos considerando diferentes rangos de temperatura. Estos y sus valores asignados, para poder calcular el modificador de salud “Temperatura de aspiración”, son recogidos en la Tabla 18.

Tabla 18. MS Temperatura de aspiración. Escenarios y valores asignados.

<i>Rango (°C)</i>	<i>< (-188)</i>	<i>(-188) - 34</i>	<i>>34</i>
<i>T_{asp}</i>			
<i>Modificador</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1.3</i>

Se parte de un histórico muy deficiente. Para cada fecha de las que se dispone de una medida de la variable T_{asp} , se calcula el valor del modificador teniendo en cuenta los rangos definidos en la Tabla 18. Finalmente, el valor del modificador de salud “ T_{asp} ” en el trimestre es calculado como el promedio de los valores del modificador dado a cada fecha. En la Tabla 19, se resumen estos cálculos para el trimestre 3 del 2016.

Tabla 19. MS Temperatura de aspiración. Trimestre 3 del 2016.

<i>Año</i>	<i>Trimestre</i>	<i>Fecha</i>	<i>T_{asp} (°C)</i>	<i>$MS T_{asp}$ Rango</i>	<i>$MS T_{asp}$</i>
2016	3	5/7/16	-159.3	1	1
		9/8/16	-159.3	1	
		5/9/16	-159.3	1	

4.2.1.3.4 Vibraciones

Tres escenarios son definidos considerando diferentes rangos de vibraciones. Estos y sus valores asignados, para poder calcular el modificador de salud “Vibraciones”, son recogidos en la Tabla 20.

Tabla 20. MS Vibraciones. Escenarios y valores asignados.

Vibraciones	<i>Rango (mm/s²)</i>	<3.35	3.35-4.35	>4.35
	<i>Modificador</i>		1	1.1

Para cada fecha de las que se dispone de una medida de la variable vibraciones, se calcula el valor del modificador teniendo en cuenta los rangos definidos en la Tabla 20. Finalmente, el valor del modificador de salud “Vibraciones” en el trimestre es calculado como el promedio de los valores del modificador dado a cada fecha. En la

Tabla 21, se resumen estos cálculos para el trimestre 3 del 2016.

Tabla 21. MS Vibraciones. Trimestre 3 del año 2016.

Año	Trimestre	Fecha	Vibraciones (mm/s²)	MS Vibraciones Fecha dato	MS Vibraciones
2016	3	5/7/16	3.3	1	1.07
		9/8/16	3.4	1.1	
		5/9/16	3.4	1.1	

4.2.1.3.5 Número de arranques desde último mantenimiento mayor

Cuatro escenarios son definidos considerando diferentes rangos de número de arranques realizados desde el último gran mantenimiento. Estos y sus valores asignados, para poder calcular el modificador de salud “Nº Arranques”, son recogidos en la Tabla 22.

Tabla 22. MS Nº arranques. Escenarios y valores asignados.

Nº arranques	<i>Rango</i>	< 100	100-200	200-300	>300
	<i>Modificador</i>		1.1	1.15	1.2

Se parte de un histórico detallado del número de arranques del equipo. Manipulando los datos se calcula los arranques por trimestre. En la Tabla 23, se resumen estos datos para el trimestre 3 del 2016.

Tabla 23. MS Nº Arranques. Trimestre 3 del año 2016.

Año	Trimestre	Nº arranques Trimestre	MS Nº Arranques
2016	3	157	1.15

Una vez se tienen todos los modificadores de salud específicos para el trimestre evaluado, el valor del modificador de salud del activo es calculado mediante la expresión (30). En la Tabla 24, se resumen los valores de los modificadores de salud específicos y el valor del modificador de salud del activo en el trimestre 3 del 2016.

Tabla 24. Modificador de salud del equipo. Caso de estudio.

<i>Año</i>	<i>Trimestre</i>	<i>MS Caudal</i>	<i>MS KW</i>	<i>MS T_{asp}</i>	<i>MS Vibraciones</i>	<i>MS Nºpartidas</i>	<i>MS activo</i>
2016	3	1.13	1.02	1.00	1.07	1.15	1.41

A continuación, se definen los modificadores de fiabilidad específicos. Estos son: inactividad y nº de grandes mantenimientos.

4.2.1.3.6 Inactividad

Tres escenarios son definidos considerando diferentes rangos de porcentaje de horas de inactividad del activo en el trimestre. Estos y sus valores asignados, para poder calcular el modificador de fiabilidad “Inactividad” son recogidos en la Tabla 25.

Tabla 25. MF Inactividad. Escenarios y valores asignados.

<i>Inactividad</i>	<i>Rango (%)</i>	<i>0-50</i>	<i>50-75</i>	<i>75-100</i>
<i>Modificador</i>		<i>1</i>	<i>1.05</i>	<i>1.1</i>

Partiendo de las horas de funcionamiento en cada trimestre se calculan las horas de inactividad del equipo y posteriormente el porcentaje de inactividad en dichos trimestres. En la Tabla 26, se resumen estos datos para el trimestre 3 del 2016.

Tabla 26. MF Inactividad. Trimestre 3 del año 2016.

<i>Año</i>	<i>Trimestre</i>	<i>Horas de Inactividad</i>	<i>%Inactividad</i>	<i>MF Inactividad</i>
2016	3	116	95%	1.1

4.2.1.3.7 Nº Grandes Mantenimientos

Tres escenarios son definidos considerando diferentes rangos de número de grandes mantenimientos realizados al equipo hasta el momento de evaluación. Estos y sus valores asignados, para poder calcular el modificador de fiabilidad “Nº grandes mantenimientos” son recogidos en la Tabla 27.

Tabla 27. MF Nº Grandes Mtto. Escenarios y valores asignados.

<i>Nº grandes mantenimientos</i>	<i>Rango</i>	<i>0-3</i>	<i>3-5</i>	<i>>5</i>
<i>Modificador</i>		<i>1</i>	<i>1.05</i>	<i>1.1</i>

Partiendo de un histórico de grandes mantenimientos, se asigna el valor pertinente al modificador en cada trimestre. En la Tabla 28 se presentan estos datos para el trimestre 3 del 2016.

Tabla 28. MF N° Grandes Mtto. Trimestre 3 del 2016.

Año	Trimestre	Nº Grandes mtto	MF nº Grandes mtto
2016	3	0	1

Una vez calculados todos los modificadores de fiabilidad específicos para el trimestre evaluado, el valor del modificador de fiabilidad del activo puede calcularse mediante la expresión (31). En la Tabla 29 se resumen estos datos para el trimestre 3 del año 2016.

Tabla 29. Modificador de fiabilidad del activo.

Año	Trimestre	MF Inactividad	MF N° Grandes mtto	MF activo
2016	3	1.1	1.0	1.1

Finalmente, el índice de salud tras el bloque condición HI_t^{Cond} es calculado mediante la expresión (32). En la Tabla 30, se presentan los valores del modificador de salud, fiabilidad y los valores de HI_t^{Deg} y HI_t^{Cond} para el trimestre analizado, trimestre 3 del año 2016.

Tabla 30. Bloque condición. Trimestre 3 del 2016.

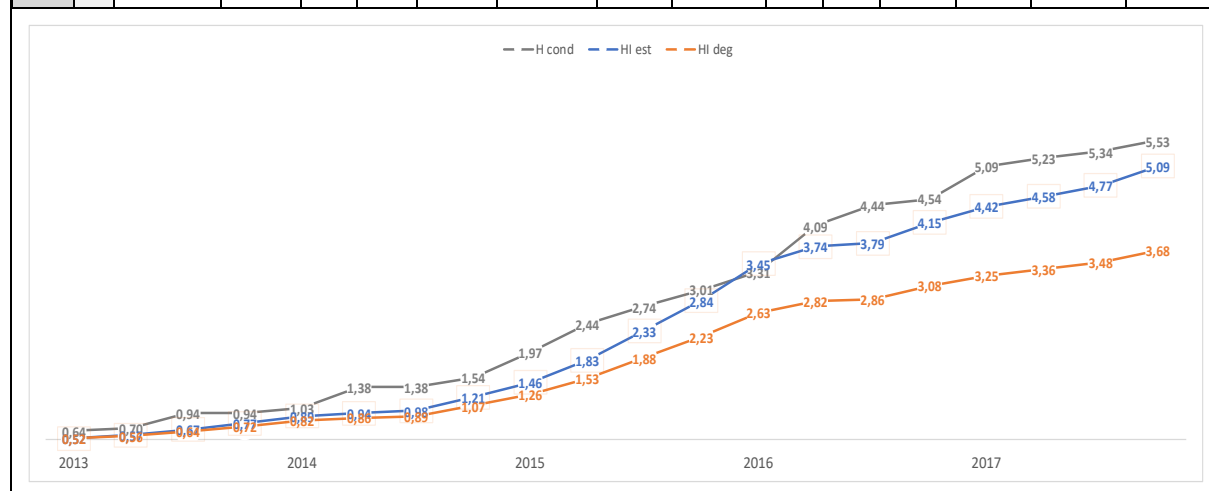
Año	Trimestre	MS	MF	HI_t^{Deg}	HI_t^{Cond}
2016	3	1.41	1.10	2.86	4.44

El proceso seguido hasta ahora para calcular el valor de HI_t^{Cond} en el tercer trimestre de 2016, es repetido para cada trimestre del periodo analizado (2013-2017). Los resultados para este periodo son mostrados en la Tabla 31.

Tabla 31. Índice de Salud del activo hasta el análisis (2013-2017). Resultados bloques.

Periodos	Tiempo operación (horas)	Caudal	KW	Tasp	Vibrac.	Nº partidas	Inact.	Grandes mtto	MS	MF	HI_t^{Est}	HI_t^{Deg}	HI_t^{Cond}	PHI_t	
2013	T1	298	1,00	1,03	1,00	1,00	1,10	1,10	1,00	1,13	1,10	0,52	0,52	0,64	0,64
	T2	1142	1,00	1,01	1,00	1,06	1,10	1,05	1,00	1,18	1,05	0,57	0,56	0,70	0,70
	T3	2405	1,20	1,06	1,00	1,05	1,10	1,00	1,00	1,47	1,00	0,67	0,64	0,94	0,94
	T4	3598	1,00	1,02	1,00	1,00	1,10	1,00	1,00	1,12	1,00	0,77	0,72	0,94	0,94
2014	T1	4832	1,10	1,03	1,00	1,00	1,10	1,00	1,00	1,25	1,00	0,89	0,82	1,03	1,03
	T2	5291	1,25	1,01	1,00	1,05	1,10	1,10	1,00	1,46	1,10	0,94	0,86	1,38	1,38
	T3	5637	1,20	1,01	1,00	1,00	1,10	1,10	1,00	1,33	1,10	0,98	0,89	1,38	1,38

Periodos	Tiempo operación (horas)	Caudal	KW	Tasp	Vibrac.	Nº partidas	Inact.	Grandes mtto	MS	MF	HI_t^{Est}	HI_t^{Deg}	HI_t^{Cond}	PHI_t	
T4	7371	1,20	1,04	1,00	1,05	1,10	1,00	1,00	1,44	1,00	1,21	1,07	1,54	1,54	
2015	T1	8944	1,25	1,05	1,00	1,04	1,15	1,00	1,00	1,56	1,00	1,46	1,26	1,97	1,97
	T2	10826	1,30	1,07	1,00	1,00	1,15	1,00	1,00	1,60	1,00	1,83	1,53	2,44	2,44
	T3	12820	1,20	1,04	1,00	1,02	1,15	1,00	1,00	1,46	1,00	2,33	1,88	2,74	2,74
	T4	14486	1,13	1,01	1,00	1,03	1,15	1,00	1,00	1,35	1,00	2,84	2,23	3,01	3,01
2016	T1	16118	1,00	1,04	1,00	1,05	1,15	1,00	1,26	1,00	3,45	2,63	3,31	3,31	
	T2	16789	1,10	1,07	1,00	1,02	1,15	1,05	1,38	1,05	3,74	2,82	4,09	4,09	
	T3	16905	1,13	1,02	1,00	1,07	1,15	1,10	1,41	1,10	3,79	2,86	4,44	4,44	
	T4	17644	1,18	1,03	1,00	1,00	1,15	1,05	1,40	1,05	4,15	3,08	4,54	4,54	
2017	T1	18168	1,15	1,03	1,00	1,00	1,20	1,10	1,42	1,10	4,42	3,25	5,09	5,09	
	T2	18478	1,10	1,02	1,00	1,05	1,20	1,10	1,41	1,10	4,58	3,36	5,23	5,23	
	T3	18805	1,15	1,01	1,00	1,00	1,20	1,10	1,40	1,10	4,77	3,48	5,34	5,34	
	T4	19360	1,10	1,08	1,00	1,00	1,20	1,05	1,43	1,05	5,09	3,68	5,53	5,53	



4.2.2 Proyección del índice de salud del activo (2018-2035)

Al ser la frecuencia de los mantenimientos mayores dada por el fabricante de 7 años (estrategia 1) y al haber transcurrido 6 años desde la puesta en marcha del equipo, se pasa a proyectar el índice de salud un año. A partir de ahora, los cálculos del índice se harán por año en vez de por trimestre tal como se había estado haciendo hasta ahora. En la Tabla 32, se muestra el valor de PHI por año, correspondiendo este, al valor calculado para el último trimestre de cada año.

Tabla 32. PHI por año del caso de estudio (2013-2017).

Periodo	2013	2014	2015	2016	2017
Nº periodo	1	2	3	4	5
PHI_t	0.94	1.54	3.01	4.54	5.53

Para poder proyectar el índice de salud es necesario conocer el valor de la tasa de envejecimiento corregida β_c , la cual es calculada mediante la ecuación (33), considerando $PHI_{t_a}=5.53$ y $t_a=5$.

$$\beta_c = \frac{\text{Ln} \frac{PHI_{t_a}}{HI_n}}{t_a} = \frac{\text{Ln} \frac{5.53}{0.5}}{5} = 0.48$$

Utilizando la expresión (34), el índice de salud futuro (FHI_t) es calculado para seis periodos de tiempo, es decir para 6 años, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 33.

Tabla 33. FHI de seis periodos para $\beta_c=0.48$.

Nº periodo	1	2	3	4	5	6
FHI_t	0.81	1.31	2.11	3.42	5.53	8.93

Teniendo en cuenta los valores obtenidos de PHI_t y FHI_t (Tabla 32 y Tabla 33 respectivamente) se muestra en la Figura 25, la evolución del índice de salud del equipo en el periodo 2013-2035 teniendo en cuenta la estrategia 1 de mantenimientos mayores.

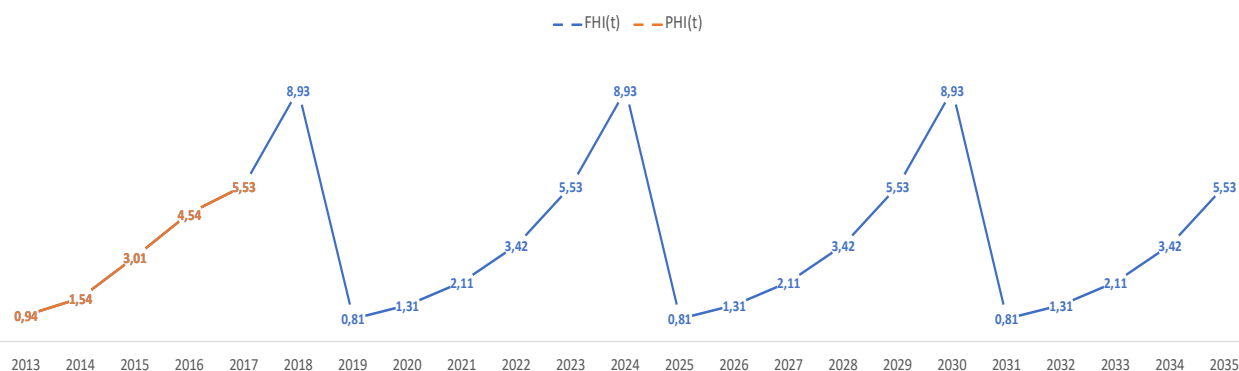


Figura 25. Comportamiento índice de salud del equipo durante 2013-2035 considerando la estrategia 1

4.2.3 Estimación de las tasas de fallos (2018-2035)

Teniendo en cuenta los modos de fallos críticos y sus tasas de fallos estándar mostradas en la Tabla 8, el factor multiplicador F_m y las tasas de fallos estimadas de cada modo de fallo (PoF Mf) durante el periodo 2018-2035 son calculadas mediante la expresión (35), siendo $C=0.262$.

Los valores de estas variables para el intervalo de estudio 2018-2035 son presentados en la Tabla 34.

Solo se muestra la tasa de fallo estimada del modo de fallo 1 y 2 ya que los otros dos modos tienen una tasa de fallo igual a cero.

Tabla 34. Tasas de fallos actualizadas de Mf1 y Mf2 considerando estrategia 1.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
AHI	8,93	0,81	1,31	2,11	3,42	5,53	8,93	0,81	1,31	2,11	3,42	5,53	8,93	0,81	1,31	2,11	3,42	5,53
Fm	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
PoF (Mf1)	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
PoF(Mf2)	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0	8,2	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0

4.3 Análisis de Coste de Ciclo de Vida (2013-2035)

Los tipos de costes considerados en este caso de estudio son: Costes Operacionales (CO), Costes de Mantenimiento Preventivo (CMP), Costes Totales por Fiabilidad (CTPF) y Costes de Mantenimientos Mayores (CMM). Sus valores son recogidos en la Tabla 35.

Tabla 35. Tipos de coste y sus valores para el caso de estudio.

CO	65688	€/año	Modo de fallo	Consecuencia económica por fallo	
CMP	1200	€/año	Válvula Automática	100	€/fallo
CMM	25000	€/unidad	CTPF Instrumentación	2100	€/fallo

Considerando estos datos de coste y la evolución de las tasas de fallos estimadas de cada modo de fallo al considerar la frecuencia de mantenimientos mayores dada por el fabricante (7 años) (estrategia 1), el perfil de gastos asociado a esta estrategia es calculado utilizando las ecuaciones (41)-(43). Véase Figura 26.

4.4 Analisis de estrategias

Una vez calculado el TOTEX de la estrategia 1, la estrategia 2 es analizada con la finalidad de mejorar la fiabilidad del equipo y reducir en lo máximo posible el TOTEX del perfil de gastos asociado. Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 10, se debe volver aplicar los siguientes pasos teniendo en cuenta la nueva estrategia: proyectar el índice de salud del activo, estimar las tasas de fallos de los modos de fallos y calcular el TOTEX del perfil de gasto asociado a la nueva estrategia.

La estrategia 2 se define como aquella en la que los mantenimientos mayores se llevan a cabo cuando el índice de salud del activo alcanza el valor de 5.5. Teniendo en cuenta la nueva estrategia, los mantenimientos mayores son adelantados y a diferencia de la estrategia 1, se realiza un reinversión más, llevándose a cabo un total de cuatro mantenimientos mayores durante el periodo 2013-2035. En la Figura 27 se recogen los cálculos obtenidos para la nueva estrategia.

4.5 Comparativa de estrategias

El CAPEX y OPEX por año para cada estrategia, es mostrado en la Tabla 36. Se observa que el TOTEX obtenido en la estrategia 1 es de 1.849.932 €, mientras que para la estrategia 2 es de 1.823.325 €, existiendo por tanto una diferencia entre ambas estrategias de 26.607 €.

Se puede concluir que aplicar la estrategia 2 de mantenimientos mayores para este caso de estudio concreto, permite mantener los niveles de fiabilidad del activo en un rango más controlado, además de reducir el gasto total del perfil de gasto asociado a dicha estrategia durante el periodo analizado (2018-2035).

Como se comentó al principio de este capítulo, este caso de estudio pertenece a un análisis real más global en el que se evaluaban 59 equipos de una planta de regasificación. Mediante la aplicación del modelo planteado en el presente trabajo, se adelantaron los mantenimientos mayores de 42 de ellos y se retrasaron 7, logrando mantener los niveles de fiabilidad de los activos más controlados y reducir el TOTEX del perfil de gasto 2018-2035 en 5.043.340 €.

Como se ha podido comprobar mediante el caso de estudio, el gestor de mantenimiento, mediante la aplicación del modelo planteado, posee una herramienta objetiva para aumentar la eficiencia del proceso de toma de decisiones relacionadas con las frecuencias de los mantenimientos mayores de los activos, maximizando la rentabilidad de la organización y minimizando los riesgos operacionales (fiabilidad y disponibilidad) y financieros relacionados con el ciclo de vida de los activos.

Tabla 36. Comparativa costes financieros estrategia 1 y 2.

Equipo	Estrategia	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	TOTEX (2018-20135)	
Grupo motobomba de baja presión	1	CAPEX	0,0	26,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1.849.932 €
		OPEX	87,5	73,3	75,5	77,8	80,1	90,4	104,5	87,5	90,1	92,8	95,6	107,9	124,8	104,5	107,6	110,9	114,2	128,9	
	2	CAPEX	25,8	0,0	0,0	0,0	0,0	29,9	0,0	0,0	0,0	0,0	34,6	0,0	0,0	0,0	0,0	40,1	0,0	0,0	1.823.325 €
		OPEX	71,2	73,3	75,5	77,8	87,7	82,5	85,0	87,5	90,1	101,7	95,6	98,5	101,5	104,5	117,9	110,9	114,2	117,6	

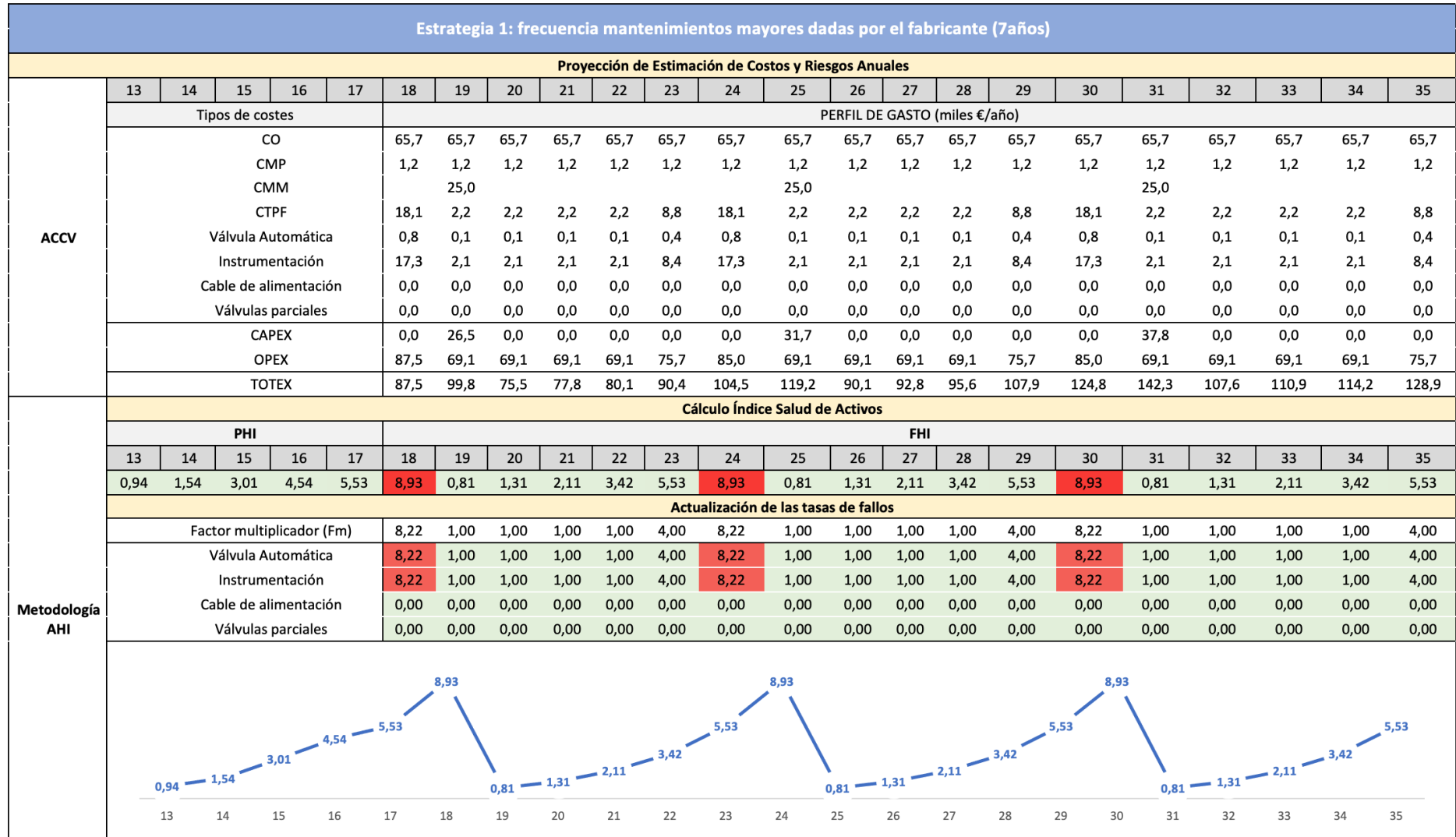


Figura 26. Perfil de gastos asociado a la estrategia 1 del caso de estudio.

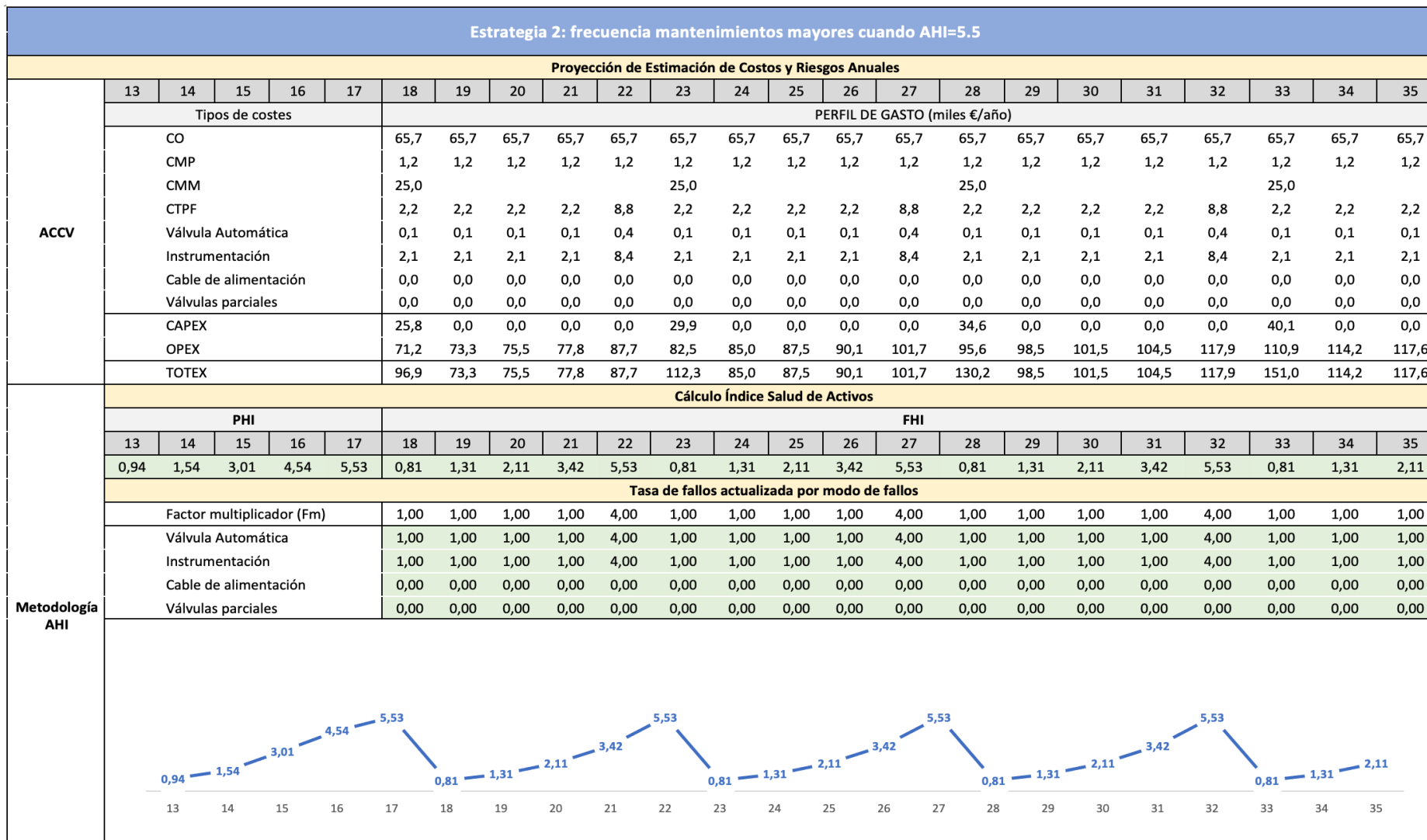


Figura 27. Perfil de gastos asociado a la estrategia 2 del caso de estudio.

5 CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones del trabajo y las posibles líneas futuras de investigación. En cuanto a las conclusiones, en primer lugar se comentarán aquellas conclusiones técnicas extraídas del trabajo y en segundo lugar se mencionan algunas conclusiones y experiencias más personales tenidas durante la elaboración del mismo.

5.1 Conclusiones técnicas del trabajo

Una vez expuesta la teoría del modelo y su caso de estudio, se hace patente que a la hora de analizar las estrategias de mantenimientos mayores para activos de alta capitalización, es fundamental tener en consideración las condiciones de operación de estos. Con la finalidad de realizar la reinversión a cada equipo en el momento idóneo, es necesario modelar de alguna forma la vinculación existente entre las condiciones de operación, el estado de salud, las probabilidades de fallo y el coste de ciclo de vida del activo. El modelo propuesto, propone realizar estas vinculaciones mediante la aplicación de una metodología de “Índice de Salud de Activos” y de “Análisis de Coste de Ciclo de Vida”. De manera, que una vez conocidas las citadas relaciones, será posible analizar diferentes estrategias de mantenimientos mayores y hallar aquella que minimice el coste total (TOTEX) de ciclo de vida del activo y mantenga los niveles de fiabilidad del equipo de manera controlada.

Por otro lado, al incluir en el modelo la metodología de “Análisis de Criticidad”, permite al gestor de mantenimiento, por un lado, identificar aquellos equipos sobre los que es prioritario dirigir recursos económicos, humanos y tecnológico, pero también, tener conocimiento de aquellos equipos en los es posible dilatar el momento de su reinversión sin conllevar un alto riesgo de fallo y por ende de consecuencias económicas para la organización.

Por tanto, mediante la aplicación de las tres metodologías propuestas, el gestor de mantenimiento dispone de una herramienta objetiva para priorizar las intervenciones y tomar decisiones relacionadas con el control de fallos que maximicen la rentabilidad y minimicen los riesgos operacionales (fiabilidad y disponibilidad) y financieros (relacionados con el coste de ciclo de vida) de la organización.

5.2 Experiencias personales durante la elaboración del trabajo

El trabajo desarrollado, se enmarca dentro de un programa de beca realizado con el Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas I, concretamente con el grupo de investigación, Sistemas Inteligentes de Mantenimiento. Esta colaboración, supuso mi primer contacto con la empresa privada, de manera que fue mi primera experiencia con una realidad que antes no conocía. Hasta ahora en la teoría, todo funcionaba bien y toda la información necesaria estaba al alcance. Mi primera sorpresa fue la no disponibilidad por parte de la empresa de la información necesaria para poder llevar a cabo el modelo. Salen a la luz las primeras limitaciones y por tanto la necesidad de buscar alternativas, supuestos e hipótesis para poder avanzar y obtener resultados.

Las primeras reuniones de equipo se llevan a cabo y a diferencia de los trabajos en equipo de la universidad, la personas que tenía enfrente no la conocías de nada. Descubrí la importancia de mantener una comunicación fluida con el cliente, tanto personal como profesional. Crear un clima agradable en las reuniones de equipo se hacía fundamental para que estas fueran productivas y provechosas para todas las partes.

A medida que iban pasando los días me iba dando cuenta que muchas de las decisiones tomadas por la organización no estaban respaldadas por ningún modelo o criterio técnico, había grandes partidas de dinero destinadas a reinversiones que no seguían ningún criterio o estrategia aparente. Este punto me hizo reforzar la idea de seguir investigando en esta área con la finalidad de poder ofrecer técnicas y modelos que permitan al gestor de mantenimiento tener herramientas de apoyo para poder tomar decisiones objetivas y justificables ante la alta dirección.

5.3 Líneas futuras de investigación

- Mejorar la formulación utilizada en la metodología de Índice de Salud de Activos. Durante el transcurso de este trabajo se han encontrado debilidades en esta formulación. A la hora de calcular el índice de salud de activo hasta el momento del análisis PHI_t , PHI_t es independiente de PHI_{t-1} a no ser que $PHI_t < PHI_{t-1}$, instante en el que la metodología asigna $PHI_t = PPHI_{t-1}$. Esta es la manera que la metodología utiliza para tener en cuenta el deterioro acumulado. De manera que sería interesante, investigar como podría modificarse la formulación para conseguir que el deterioro obtenido en un punto, se vea reflejado en el siguiente punto de análisis.
- Definir por tipo de equipos, los rangos de valores dados al factor de ubicación y a los modificadores de salud y fiabilidad. Actualmente estos valores son tomados de la DNO y se están aplicando por igual a cualquier tipo de equipo.
- Automatizar el modelo mediante software. Sería verdaderamente útil a la hora de tomar decisiones por parte del gestor de mantenimientos disponer de un mapa de salud de su flota de activos en tiempo real, como el que se muestra en la Figura 28.

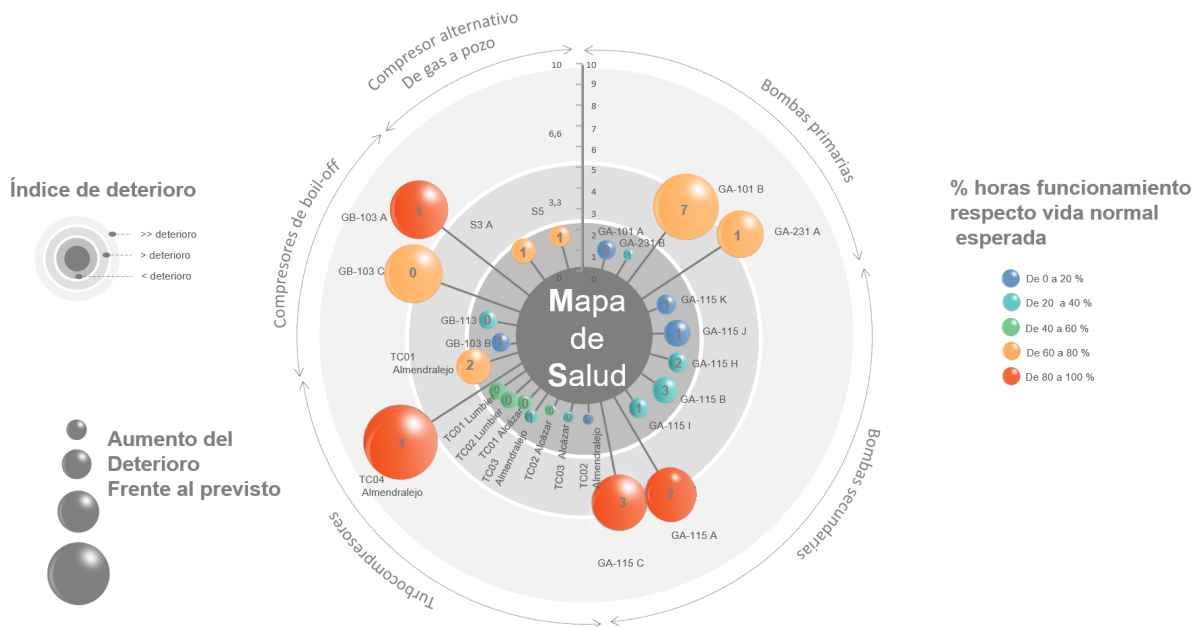


Figura 28. Mapa de salud de una flota de activos.

REFERENCIAS

- [1] A. Crespo Márquez, P. Moreu De León, A. Sola Rosique, y J. F. Gómez Fernández, «Criticality analysis for maintenance purposes», *Adv. Maint. Model. Asset Manag. Tech. Methods Complex Ind. Syst.*, pp. 143-166, jul. 2017.
- [2] GB DNO groups, «DNO Common Network Asset Indices Methodology, Health & Criticality-Version 2.1».
- [3] «IAM - Subjects 6 and 7: Capital Investment Operation and Maintenance Decision-Making». [En línea]. Disponible en: <https://theiam.org/knowledge-library/subjects-6-and-7-capital-investment-operation-and-maintenance-decision-making/>. [Accedido: 15-oct-2021].
- [4] C. Parra y A. Crespo, *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos*. INGECON, 2012.
- [5] N. U. Ahmed, «A design and implementation model for life cycle cost management system», *Inf. Manag.*, vol. 28, n.º 4, pp. 261-269, abr. 1995.
- [6] H. Levy y M. Sarnat, *Capital investment and financial decisions*. Pearson Education, 1994.
- [7] C. Parra Márquez, «Desarrollo de modelos de cuantificación económica del factor “Fiabilidad” en el coste total del ciclo de vida de un sistema de producción trabajo propuesto para optar por el título de doctor», 2009.
- [8] J. Serra *et al.*, «A Model for Lifecycle Cost Calculation Based on Asset Health Index», en *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making*, 2019, pp. 91-98.
- [9] R. L. Wilson, «Operations and support cost model for new product concept development», *Comput. Ind. Eng.*, vol. 11, n.º 1-4, pp. 128-131, ene. 1986.
- [10] J. Woodhouse, «Turning engineers into businessmen», en *14th National Maintenance Conference*, 1991.
- [11] D. G. Woodward, «Life cycle costing—Theory, information acquisition and application», *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 15, n.º 6, pp. 335-344, dic. 1997.
- [12] H. Riddell y A. Jennings, «Asset Investment & Life Cycle Costing», *Woodhouse Partnership, Tech. Pap. London*, 2001.
- [13] B. S. Blanchard, W. J. Fabrycky, y W. J. Fabrycky, *Systems engineering and analysis*, vol. 4. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1990.
- [14] C. Parra, A. Crespo, P. Cortes, y S. Fyqueroa, «On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models», *Saf. Reliab. Manag. Risk, Taylor Fr. Group. London*, pp. 2203-2214, 2006.
- [15] W. J. Fabrycky y B. S. Blanchard, *Life-cycle cost and economic analysis*, vol. 135383234. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [16] D. Willians y R. Scott, «Reliability and Life Cycle Costs», *RM-Reliability Gr.*, 2000.
- [17] D. Kececioglu, *Reliability and life testing handbook*, vol. 2. DEStech Publications, Inc, 2002.
- [18] C. E. Ebeling, «Reliability and Maintainability Engineering, The McRaw-Hill Companies», *INC, USA*, 1997.
- [19] T. Hjartarson y S. Otal, «Predicting Future Asset Condition Based on Current Health Index and Maintenance Level», en *ESMO 2006 - 2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, 2006.
- [20] A. Naderian, S. Cress, R. Piercy, F. Wang, y J. Service, «An approach to determine the health index of

-
- power transformers», en *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008, pp. 192-196.
- [21] M. Vermeer, J. Wetzter, P. van der Wielen, E. de Haan, y E. de Meulemeester, «Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model», en *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1-6.
- [22] F. Scatiggio y M. Pompili, «Health Index : the TERNA ' s Practical Approach for Transformers Fleet Management», n.º June, pp. 178-182, 2013.
- [23] F. Scatiggio, M. Rebolini, T. R. Italia, y M. Pompili, «Health Index: the last frontier of TSO's asset management», pp. 1-9, 2016.
- [24] A. CRESPO MÁRQUEZ y C. A. Parra Márquez, «Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos». INGEMAN, 2012.
- [25] A. Sola Rosique, «Marco de referencia para la gestión de activos de alta capitalización. Definición de procesos de negocio y de técnicas avanzadas de soporte a la gestión», jul. 2017.
- [26] C. Parra y A. Crespo Marquez, «Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos». 2019.
- [27] J. Serra Parajes, A. Crespo Márquez, y A. Sola Rosique, «Criticality analysis for preventive maintenance optimization purposes in gas network infrastructures», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.*, vol. 232, n.º 4, pp. 464-472, 2018.
- [28] A. C. Márquez, J. S. Parajes, A. de la Fuente Carmona, y A. S. Rosique, «Integrating complex asset health modelling techniques with continuous time simulation modelling: A practical tool for maintenance and capital investments analysis», *Comput. Ind.*, vol. 133, p. 103507, 2021.