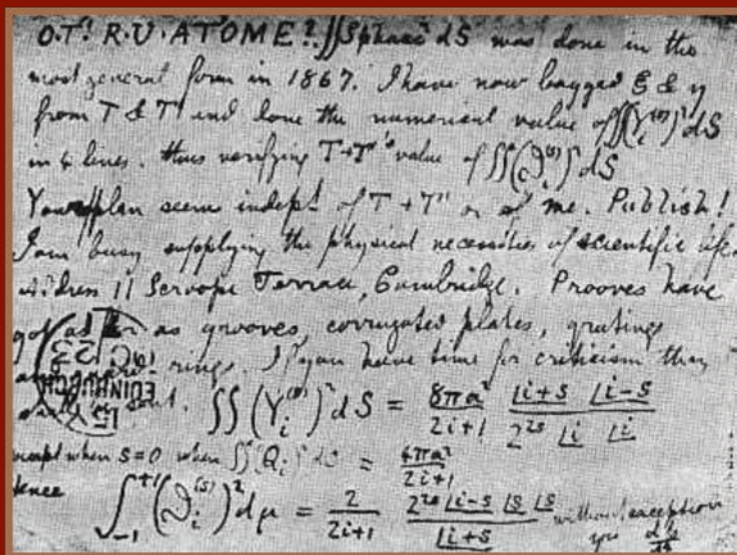


# Tesis Doctoral

Ingeniería Mecánica y de Organización Industrial

## Determinación de Estrategia de Optimización del Ciclo de Vida de Activos de Alta Capitalización en la Industria del Gas Natural



Autor: Javier Serra Parajes

Director: Adolfo Crespo Márquez

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

2022





Tesis Doctoral  
Ingeniería Mecánica y de Organización Industrial

Determinación de Estrategia de  
Optimización del Ciclo de Vida de  
Activos de Alta Capitalización en la  
Industria del Gas Natural

Autor:

Javier Serra Parajes

Director:

Adolfo Crespo Márquez

Catedrático

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Tesis doctoral: Determinación de Estrategia de Optimización del Ciclo de Vida de Activos de Alta Capitalización en la Industria del Gas Natural

Autor: Javier Serra Parajes

Tutor: Adolfo Crespo Márquez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Sevilla, 2022



*A mis padres*

*A mi hermano*

*A Pedro, Ana y Jorge*

*A Eva*





# Agradecimientos

---

Uno de los sentimientos que más me han invadido en la fase final de la realización de la presente tesis doctoral, es que me estaba adueñando de parte del trabajo realizado por grandes compañeros y enormes profesionales. Y es que, en el fondo, gran parte de mi trabajo ha consistido en ser catalizador y escriba de un gran proyecto de transformación de gestión en la compañía en la que actualmente ejerzo la función de gestión y mejora del mantenimiento.

Así pues, vaya por delante que en ningún momento es esa mi intención. Soy plenamente consciente de que el trabajo aquí descrito es el compendio del esfuerzo de muchísima gente, y del empuje de diversas instituciones. Soy un simple actor más, que ha visto en este proyecto la oportunidad de sumar una experiencia más a la mochila.

Me enfrento pues con este agradecimiento al último gran reto de la tesis, que es reconocer el trabajo, esfuerzo y colaboración, que directa o indirectamente, consciente o inconscientemente, han desempeñado muchas de las personas a mi alrededor.

A Adolfo Crespo, que ha sido la mayor influencia para el desarrollo de la tesis. Fue quien realmente introdujo esta idea en mi cabeza, y es en torno a quien orbitan los diversos actores que han dado forma al aspecto más académico del trabajo. No concibo haber sido capaz de llegar a todo esto sin su ayuda y cercanía, que agradezco de todo corazón.

Continuando con el mundo académico, a Antonio Sola y Antonio de la Fuente, que han sido los compañeros de publicación de los artículos incluidos en la tesis, y por tanto muy protagonistas de haber conseguido los méritos necesarios para

hacer este proyecto realidad. Trabajar con ellos ha sido realmente sencillo, y éso es de agradecer en procesos tan complejos como la elaboración de publicaciones.

A todo el grupo de investigación SIM (Sistemas Inteligentes de Mantenimiento) de la Universidad de Sevilla, porqué son el ecosistema que permite que el proceso de investigación se realice de manera natural e intuitiva. Destacar especialmente tres nombres; Pedro Moreu, ejemplo de actitud profesional y de vida, siempre dispuesto a aportar sea cual sea el ámbito de estudio; Juan Gómez, cuya aportación me ha ayudado a completar mi visión de gestión de mantenimiento con un prisma mucho más digital y por tanto más pragmático; y Antonio Guillén, que me ha ayudado mucho a situarme para este proyecto en esa delgada frontera entre la investigación científica y el pragmatismo industrial. A todo el grupo, mi enorme agradecimiento.

Por concluir con el ámbito universitario, hay gente que, sin tener una función específica, ha estado ahí para cualquier necesidad. Ejemplo de ello son Lourdes o María, siempre dispuestas a prestar cualquier tipo de ayuda que se necesite y cuya colaboración es, por propia definición, inestimable.

En el ámbito laboral, a Claudio Rodríguez, que ha sido a lo largo de todo el proceso el principal promotor y valedor de la importancia que los procesos de gestión de activos aportan a una empresa que opera y mantiene un gran volumen de infraestructuras. Bajo su responsabilidad se ha implantado el Modelo de Gestión de Mantenimiento que ampara los trabajos de investigación que presenta la tesis. Además, a nivel personal, siempre ha mostrado su disposición a facilitar cualquier aspecto que permitiera sacar este trabajo adelante.

A Juan Olmo y Rosa Nieto, que han sido responsables de la implantación del modelo en los momentos claves en los que se apoya la tesis. Su defensa y empuje para la implantación real de las metodologías ha sido determinante para dar validez al trabajo, y para que sea una realidad en Enagás.

A Jaime y Miguel, que han sido promotores del modelo desde su comienzo, y gracias a ellos se desarrollaron los pilares que hoy sustentan la gestión de mantenimiento de la compañía.

Agradecer también a todos los integrantes de las diferentes unidades que han asumido la función de promover e implantar las metodologías aquí descritas; IMCT, Grupo de Gestión de Activos, Mejora y Desarrollo, y hoy día, Gestión y Análisis de Mantenimiento. Destacar en concreto por su aportación a los trabajos de la tesis a Carmen Pereira y Sonia Liñán, responsables de los proyectos de implantación de estas metodologías en la compañía.

Por último y en el ámbito personal, a mis padres y mi hermano, que me han inculcado desde pequeño la cultura del esfuerzo, la perseverancia y la superación, tan necesarias para emprender este tipo de proyectos.

A mis hijos, Pedro, Ana y Jorge, que no es que hayan facilitado mucho el desarrollo de la tesis, pero que a pesar de sus interrupciones o las preguntas inoportunas cada vez que trataba de sentarme frente al ordenador, son fuente de energía y vitalidad y de motivación para cualquier tarea a la que me enfrente.

Por último, a Eva, mi mujer. Si hay alguien más contento que yo con el final de este proyecto, es ella. No sólo porque ya voy a poder levantarme de delante del ordenador y recuperar tiempo libre, sino por la ilusión que le hace poder llamarme "Doctor". Sería difícil emprender este tipo de proyectos en la vida sin saber que hay alguien al lado dispuesto a acompañarte. Por fortuna, no tengo que recorrer ningún camino sólo...



# Resumen

---

La combinación del conocimiento humano con la capacidad computacional de los sistemas es uno de los pilares más sólidos y fiables en la gestión de activos actualmente. No cabe duda de que ya se puede vislumbrar un futuro en el que la digitalización va a ser una parte capital en la gestión de las empresas. De hecho, en las compañías que tienen muy definidos sus procesos productivos, lleva siendo una realidad desde hace tiempo. Sin embargo, las empresas de gestión de infraestructuras tienen una serie de retos que no permiten un avance tan claro en este campo. Primero, porque sus activos no responden de manera directa a unas variables claras que permitan tomar decisiones de manera automática. Y segundo, porque aunque se consiguiera definir este “algoritmo” de decisión, se necesitaría de una base sólida de información fiable que alimentara dicho sistema, premisa que a día de hoy está muy lejana.

Por lo tanto, todas las aplicaciones digitales con una implantación real en la gestión de activos, tienen a día de hoy una componente de conocimiento especialista muy importante. Debido a esa carencia histórica de datos fiables que ahora se consideran tan necesarios y básicos para la creación de modelos y algoritmos, las soluciones que se están implantando tienden a partir de una base importante de conocimiento humano. Así que, si bien existe un futuro automatizado, no sólo en el proceso productivo, sino en el ámbito de gestión, la clave estará en cómo diseñar el modelo que lo hará funcionar de una manera efectiva.

Es justo en ese momento, donde las metodologías de gestión de mantenimiento propuestas en la tesis presentan una forma sencilla e intuitiva de hacer una primera aproximación a la gestión en base a analíticas avanzadas sin necesidad de ceder el control total a un algoritmo. El gran valor de estas técnicas, es ser capaz de transformar de una manera simple el inmenso conocimiento de los especialistas en un ámbito técnico concreto, a formulaciones con criterios objetivos de cálculo, que

derivarán en indicadores o valores que ayudarán en la gestión.

Por supuesto, estas técnicas también tienen sus detractores, pues incluir como parte esencial el factor humano, es también incluir un factor de subjetividad y de posibilidad de error, mayor que el que aparentemente podría llegar a dar un ordenador. Sin embargo, cualquier ámbito de gestión no puede estar exento del factor humano que de hecho es el mayor factor diferencial que podemos encontrar. De esa manera el reto es ser capaces de llevar a valores, fórmulas y datos, las opiniones, sensaciones y aprendizajes que han acumulado los especialistas en torno a los activos industriales que manejan.

Debido a su sencilla implantación e interpretación, estas metodologías permiten traducir todo ese conocimiento, y facilitar enormemente la comunicación, entre los especialistas técnicos, los mandos intermedios y la alta dirección. Al tener, gracias a estas técnicas, una comunicación más rápida y un mensaje más comprensible, se consiguen estrategias de gestión más eficiente y con una visión mucho más integral.

Es por tanto alcance de la tesis ser capaz de identificar e integrar dentro del modelo actual de gestión de la compañía, herramientas de gestión de mantenimiento que permitan optimizar el ciclo de vida del activo. En concreto se desarrollarán dos técnicas centradas en dos ámbitos de gestión de los activos de gran valor para la compañía; la gestión del riesgo que persigue caracterizar los equipos en función del impacto de un hipotético fallo funcional, y la gestión operativa, que persigue mejorar el rendimiento de dichos activos durante toda su vida útil.

# Abstract

---

The combination of human knowledge with the computational capacity of systems is one of the most solid and reliable pillars in asset management today. There is no doubt that we assume a future in which digitalization will be a key part of company management. In fact, in companies with well-defined production processes, it has been a reality for some time now. However, asset management companies face a series of challenges that do not allow such a clear advance in this field. Firstly, their assets do not respond directly to clear variables that allow automatic decision making. And secondly, even if this decision "algorithm" could be defined, it would require a solid base of reliable information to feed the system, a premise that is still far away.

Therefore, all digital applications with a real implementation in asset management today, have a very important component of specialist knowledge. Due to this historical lack of reliable data that is now considered so necessary and basic for the creation of models and algorithms, the solutions that are being implemented tend to start from a significant base of human knowledge. In other words, if there is an automated future, not only in the production process, but also in the management area, the key will be how to design the model that will make it work in an effective way.

It is precisely at this point where the maintenance management methodologies proposed in this thesis, present a simple and intuitive way to make a first approach to management based on advanced analytics without the need to let the control to an algorithm. The great value of these techniques is that allow to transform in a simple way the immense knowledge of specialists in a specific technical field, to formulations with objective calculation criteria, which will derive in indicators or values that will help in management.

Of course, these techniques also have their detractors. To include the human

factor as an essential part of the methodology is also to include a factor of subjectivity and the possibility of error. However, any field of management cannot be exempt from the human factor, which is in fact the greatest differential factor that we can find. Thus, the challenge is to be able to transform into values, formulas and data, the opinions, sensations and learning that specialists have accumulated around the industrial assets they manage.

Due to their simple implementation and interpretation, these methodologies make it possible to digitalise all this knowledge and facilitate communication between technical specialists, middle management and top management. By having, thanks to these techniques, a faster communication and a more understandable message, more efficient management strategies with a much more comprehensive vision are achieved.

It is the scope of the thesis to be able to identify and integrate within the current management model of the company, maintenance management tools to optimize the life cycle of the asset. Specifically, two techniques will be developed focused on two areas of asset management of great value for the company; risk management, which aims to characterize the equipment according to the impact of a hypothetical functional failure, and operational management, which aims to improve the performance of these assets throughout their useful life.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xxi</b>
<b>Glosario de términos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introducción al Trabajo de Tesis</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Introducción general</i>	1
1.2 <i>Estructura del documento</i>	3
1.3 <i>Contexto empresarial</i>	5
1.3.1 <i>Enagás</i>	5
1.3.2 <i>Reto Profesional en Gestión de Activos</i>	7
1.3.3 <i>Compromiso del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>	14
1.4 <i>Colaboración Universidad-Empresa</i>	15
1.4.1 <i>Implantación del Modelo de Gestión de Mantenimiento</i>	16
1.4.2 <i>Adaptación del MGM al sector del Gas Natural</i>	21
1.5 <i>Conclusiones</i>	23
<b>2. Objetivos de la Tesis</b>	<b>25</b>
<b>3. Metodología y Resultados</b>	<b>27</b>
3.1. <i>Bloque 1: Gestión del riesgo basada en criticidad</i>	28
3.1.1. <i>Adaptación de metodología de análisis de criticidad para cuantificación de valor en activos de la industria del gas natural</i>	29

3.1.2.	Integración de análisis de criticidad en la estrategia global de gestión de activos para optimización de mantenimiento	81
3.2.	<i>Bloque 2: Gestión del ciclo de vida operativo</i>	99
3.2.1.	Definición de Índice de Salud de Activos en activos de alta capitalización en la industria de gas natural	100
3.2.2.	Integración del Índice de salud de activos dentro del cálculo de coste del ciclo de vida de un activo	129
4.	<b>Discusión de los Resultados</b>	<b>143</b>
5.	<b>Conclusiones y Líneas de Investigación Futuras</b>	<b>147</b>
5.1.	<i>Conclusiones</i>	148
5.2.	<i>Líneas de investigación futuras</i>	152
6.	<b>Publicaciones Científicas</b>	<b>155</b>
6.1.	<i>Publicaciones en Revistas con Factor de Impacto</i>	157
6.1.1.	Criticality analysis for preventive maintenance optimization purposes in gas network infrastructures	157
6.1.2.	A model for lifecycle cost calculation based on asset health index	169
6.1.3.	Integrating complex asset health modelling techniques with continuous time simulation modelling: A practical tool for maintenance and capital investments analysis	179
6.2.	<i>Otras publicaciones</i>	199
6.2.1.	Practical application of criticality analysis in the Spanish Natural Gas Transport Network	199
6.2.2.	Criticality analysis for optimising OPEX cost lifecycle	201
6.2.3.	Defining Asset Health Indicators (AHI) to Support Complex Assets Maintenance and Replacement Strategies. A Generic Procedure to Assess Assets Deterioration	203
7.	<b>Referencias</b>	<b>205</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1; Estructura de la tesis.....	4
Figura 2; Cadena de valor del Gas Natural.....	5
Figura 3; Evolución aspectos clave de la gestión de manteninimiento.....	9
Figura 4; Modelo conceptual de la gestión de activos del IAM.....	12
Figura 5; Obtención y control de la estrategia por activo para cumplir con los objetivos del negocio.....	13
Figura 6; ODS a los que contribuye la tesis.....	14
Figura 7; Modelo de Gestión de Mantenimiento.....	17
Figura 8; Metodologías propuestas en el MGM.....	20
Figura 9; Representación del MGM-GAS.....	22
Figura 10; Ejemplo estructura arborescente de las áreas.....	37
Figura 11; Ejemplo estructura arborescente de las instalaciones.....	38
Figura 12; Ejemplo estructura arborescente de los sistemas.....	39
Figura 13; Ejemplo estructura arborescente de item mantenible.....	40
Figura 14; Resumen política gestión mantenimiento Enagás.....	42
Figura 15; Matriz de criticidad.....	54
Figura 16; Esquema EPS de un nudo de válvulas.....	57
Figura 17; Esquema gráfico de un nudo de válvulas.....	58
Figura 18; Esquema funcionamiento habitual de la instalación.....	59
Figura 19; Evento supuesto para analizar consecuencia.....	60

Figura 20; Contexto operacional ante fallo válvula "a" .....	64
Figura 21; Situación válvula "a" en matriz de criticidad .....	68
Figura 22; Alternativa suministro de gas en una red mallada .....	69
Figura 23; Situación válvula "b" en matriz de criticidad .....	71
Figura 24; Situación válvula "f" en matriz de criticidad .....	72
Figura 25; Función de by-pass .....	73
Figura 26; Situación válvula "e" en matriz de criticidad .....	75
Figura 27; Situación válvulas "g" y "d" en matriz de criticidad .....	75
Figura 28; Función de venteo de la ERM .....	76
Figura 29; Situación válvula "c" en matriz de criticidad .....	77
Figura 30; Matriz de criticidad de nudo de válvulas.....	78
Figura 31; Ejemplo de matriz de consecuencia .....	79
Figura 32; Cifras principales del proyecto de criticidad .....	80
Figura 33; Ejemplo de matriz de criticidad en Enagás .....	81
Figura 34; Propuesta de metodologías derivadas del análisis de criticidad .....	84
Figura 35; Metodologías propuestas por el MGM-GAS.....	85
Figura 36; Objetivo del ACR en la matriz de criticidad .....	87
Figura 37; Impacto de reducción de costes en el ciclo de vida .....	89
Figura 38; Modos de fallo en el ciclo de vida .....	90
Figura 39; Cálculo de tiempo óptimo de periodicidad de mantenimiento .....	91
Figura 40; Ámbito de aplicación del ACR en matriz de criticidad.....	93
Figura 41; Ámbito de aplicación del RCM en matriz de criticidad .....	94
Figura 42; Zonas de análisis de ACRB en matriz de criticidad .....	95
Figura 43; Rangos de Índice de Salud de Activos .....	104
Figura 44; Metodología de cálculo de Índice de Salud de Activos.....	107

Figura 45; Índice de Salud teórico.....	114
Figura 46; Comparativa Salud Teórica y Salud Calculada .....	118
Figura 47; Representación gráfica del Índice de Salud de Activos .....	126
Figura 48; Ejemplo de comparación de activos en función del ISA.....	127
Figura 49; Proyección de ISA para la estrategia 1 .....	132
Figura 50; Proyección ISA para estrategia 2 .....	133
Figura 51; Datos para el modelo de costes GB-203-A .....	136
Figura 52; Datos para el modelo de costes GB-203-B .....	136
Figura 53; Datos de modelo de costes estrategia 3.....	137
Figura 54; Datos de modelo de costes estrategia 4.....	137
Figura 55; Valores resultantes de la estrategia 1.....	139



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1; Relación de resultados de bloque I con publicaciones .....	29
Tabla 2; Ponderación factores de consecuencia .....	45
Tabla 3; Ponderación de factor de seguridad industrial.....	48
Tabla 4; Ponderación de factor de medioambiente .....	49
Tabla 5; Ponderación de factor de Calidad de Servicio .....	49
Tabla 6; Ponderación de factor de Calidad de Servicio .....	50
Tabla 7; Ponderación de factor de Coste de Mantenimiento.....	51
Tabla 8; Resumen factores de consecuencia y niveles de severidad.....	51
Tabla 9; Ponderación de factor de frecuencia de fallo.....	52
Tabla 10; Valoración criterio Seguridad Industrial.....	62
Tabla 11; Valoración criterio Medioambiente .....	63
Tabla 12; Valoración criterio Calidad de Servicio .....	64
Tabla 13; Valoración criterio Disponibilidad .....	65
Tabla 14; Valoración criterio Coste de Mantenimiento.....	66
Tabla 15; Valoración factores de consecuencia de válvula “a” .....	66
Tabla 16; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “a” .....	67
Tabla 17; Valoración factores de consecuencia válvula “b” .....	71
Tabla 18; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “b” .....	71
Tabla 19; Valoración factores de consecuencia válvula “e” .....	74
Tabla 20; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “e” .....	75
Tabla 21; Valoración factores de consecuencia válvula “c” .....	77

Tabla 22; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “c” .....	77
Tabla 23; Reacción de resultados de bloque II con publicaciones .....	100
Tabla 24; Ponderación factor de emplazamiento distancia a la costa .....	110
Tabla 25; Ponderación factor de temperatura exterior .....	110
Tabla 26; Ponderación exposición agentes externos (atmósfera explosiva) .....	111
Tabla 27; Ponderación exposición agentes externos (polvo en suspensión) .....	111
Tabla 28; Valor del rango del modificador de salud; Caudal .....	122
Tabla 29; Valor del rango del modificador de salud; T <sup>a</sup> Aspiración .....	122
Tabla 30; Valor del rango del modificador de salud; ΔTemperatura .....	123
Tabla 31; Valor del rango del modificador de salud; Nivel del tanque .....	123
Tabla 32; Valor del rango del modificador de salud; N <sup>o</sup> arranques .....	123
Tabla 33; Valor del rango del modificador de salud; Nivel vibraciones .....	123
Tabla 34; Valor del rango del modificador de fiabilidad; % Inactividad .....	124
Tabla 35; Valor del rango del modificador de fiabilidad; Fabricante .....	124
Tabla 36; Valor del rango del modificador de fiabilidad; Overhauls .....	124
Tabla 37; Valor del modificador de Salud .....	125
Tabla 38; Valor del modificador de fiabilidad .....	125
Tabla 39; Resumen de publicaciones con factor de impacto .....	155
Tabla 40; Resumen de capítulos .....	156



# Glosario de términos

---

ACCV	Análisis de Coste del Ciclo de Vida
ACR	Análisis Causa Raíz
ACRB	Análisis Coste Riesgo Beneficio
AHÍ	Asset Health Index
AHP	Proceso de jerarquía analítica
BI	Business Intelligence
CTR	Criticidad Total por Riesgo
DJSI	Dow Jones Sustainability Index
ERM	Estación de Regulación y Medida
GMAO	Gestión Mantenimiento Asistido por Ordenador
GN	Gas Natural
IAM	The Institute of Asset Management
ISA	Índice de Salud de Activos
KPI	Key Performance Indicator
MGM	Modelo de Gestión de Mantenimiento
MGM-GAS	Modelo de Gestión de Mantenimiento adaptado al sector Oil&Gas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
O&M	Operación y Mantenimiento
RCM	Mantenimiento Centrado en Fiabilidad
RCO	Risk Cost Optimization
RPN	Risk Priority Number o Número de Prioridad del Riesgo
SGM	Sistema de Gestión de Mantenimiento
TOTEX	Total Expenditures



# 1 INTRODUCCIÓN AL TRABAJO DE TESIS

---

## 1.1 Introducción general

A lo largo de esta introducción se va a tratar de dar un contexto para entender el alcance y motivación del trabajo desarrollado en la presente tesis doctoral. También se hace una breve reflexión en relación a las modalidades bajo las que se presenta la tesis; compendio de publicaciones y mención de Doctorado Industrial.

Con relación a la modalidad de compendio de publicaciones y desde el punto de vista de quien está a punto de someter a valoración el trabajo desarrollado durante los últimos 5 años, es una posibilidad que facilita enormemente emprender un proyecto de estas características. La posibilidad de que la investigación vaya siendo evaluada por el mundo académico, no sólo desde un punto de vista de calidad, sino de interés y relevancia, permite que se vaya estableciendo una relación de propuesta-validación a lo largo de todo el proceso que da mucha seguridad de cara a invertir los esfuerzos necesarios para un trabajo como este. Adicionalmente, y así también hay que reconocerlo, permite economizar unos esfuerzos que muchas veces están limitados en función de la situación académica, laboral o familiar del

que trata de emprender y presentar una línea de investigación. Esta modalidad ayuda a distribuir la carga de trabajo de una manera más razonable a través de todo el periodo de la investigación.

Se solicita también mención de Doctorado Industrial, motivada por diversos aspectos que se quieren destacar aquí, para que permitan al lector a analizar el proceso investigador desde una perspectiva adecuada. En primer lugar, por justicia con Enagás, la empresa que ha promovido y financiado todo el proceso, siendo lo expuesto en la tesis, parte de un proyecto de implantación de un modelo de gestión integral en la compañía. En segundo lugar, también se quiere hacer notar que, dentro del proceso investigador, la tesis se centra en casos de aplicación o comúnmente denominados “case studies”. Los análisis más teóricos de las metodologías han sido parte central de otras líneas de investigación y tesis doctorales, partiendo en el trabajo que aquí se presenta de las conclusiones presentadas en su momento. Es por tanto un trabajo de investigación sobre la adaptación y aplicación de dichas metodologías, siendo especial objetivo de la tesis documentar y compartir este proceso en cuestión.

Así pues, destacar que más allá de los objetivos específicos de investigación, y del interés que se pudiera tener desde un punto de vista laboral o académico, la motivación personal para la realización de la presente tesis doctoral, es compartir la experiencia desarrollada en Enagás en estos últimos 5 años, y que realmente pueda ser de interés para aquellos que se enfrenten a procesos similares. Por este motivo, se quiere también destacar que el documento refleja fielmente el proceso y los aspectos clave del proyecto desarrollado en Enagás, si bien no es una copia exacta de lo que está implantado en la compañía. Si fuera así, la tesis se vería sujeta a confidencialidad, lo que no acotaría significativamente la motivación original del trabajo, que es compartir el conocimiento.

## 1.2 Estructura del documento

Como se ha descrito previamente, en todo momento se va a tratar de compartir el trabajo desarrollado de manera sencilla y comprensible. Va a ser una constante el tratar de ejemplificar y explicar lo más posible cada uno de los puntos en un lenguaje llano y directo. Y para que desde el principio pueda cumplirse esa premisa, se va a explicar brevemente la estructura del documento, de manera que se conozca a alto nivel que se presenta en cada una de sus partes. En el apartado 1 se realiza una introducción al contexto empresarial, así como los retos de los que parte la colaboración Universidad-Empresa que es hilo conductor de los trabajos desarrollados y expuestos en la tesis. El apartado 2 recoge los objetivos concretos de la tesis de los que manarán los diferentes retos planteados como línea de investigación. En el apartado 3 se exponen de manera concreta los retos en los que se han sintetizado los trabajos a realizar, así como los resultados que se exponen y que es la aportación que realiza la tesis. De manera secuencial se irá exponiendo cada cuestión (Q), con la línea de trabajo seguida para conseguir un resultado (R) concreto, que se resumirá al final. Estas cuestiones se han agrupado a su vez en dos bloques diferenciados en función de los objetivos perseguidos. En el apartado 4 se hace una recapitulación final de los resultados obtenidos, recogiendo las conclusiones y posibles líneas de investigación a realizar en los próximos años en el apartado 5. En el apartado 6 se recogen de manera íntegra las publicaciones que se han presentado como aval de la presentación de la tesis en su modalidad de compendio de publicaciones, y justifican la base científica del trabajo de doctorado. También se expondrá el resumen de los capítulos de los libros en los que el presente autor ha participado, que, si bien no han sido incluidas para la justificación de calificación de tesis por compendio, reflejan parte del trabajo desarrollado a lo largo de estos años.

Como resumen de las líneas de investigación y con el objetivo de ayudar a una mejor comprensión de la estructura de la tesis y del presente documento, se introduce un breve esquema en la Figura 1, que relaciona los conceptos de:

- **Cuestiones o preguntas de la tesis;** es el resumen de los interrogantes clave que han generado las líneas de trabajo expuestas
- **Resultados;** Es la descripción de los entregables obtenidos de cada línea de investigación propuestas a raíz de las cuestiones previas
- **Publicaciones científicas;** Son las publicaciones relacionadas con el

alcance de la tesis en las que el autor ha participado a lo largo de la realización de ésta. Se han presentados como soporte para la justificación de la presentación de la tesis en su modalidad de compendio, y por tanto han sido publicados en revistas internacionales indexadas con índice de impacto JCR. Dan soporte a justificar de manera objetiva el interés científico del contenido de la tesis.

- **Capítulos de libro;** En este apartado se incluyen capítulos de libros en los que el autor de la tesis ha participado directamente. Se han incluido en este apartado dos publicaciones recogidas en un libro de “proceedings” (publicación en formato libro electrónico de papers presentados en congresos). Hay que destacar que estos capítulos no han sido incluidos en los méritos para la elaboración de la tesis, pero se incluyen como referencia en esta estructura, pues se entiende que ayudan a completar la visión de la hoja de ruta.

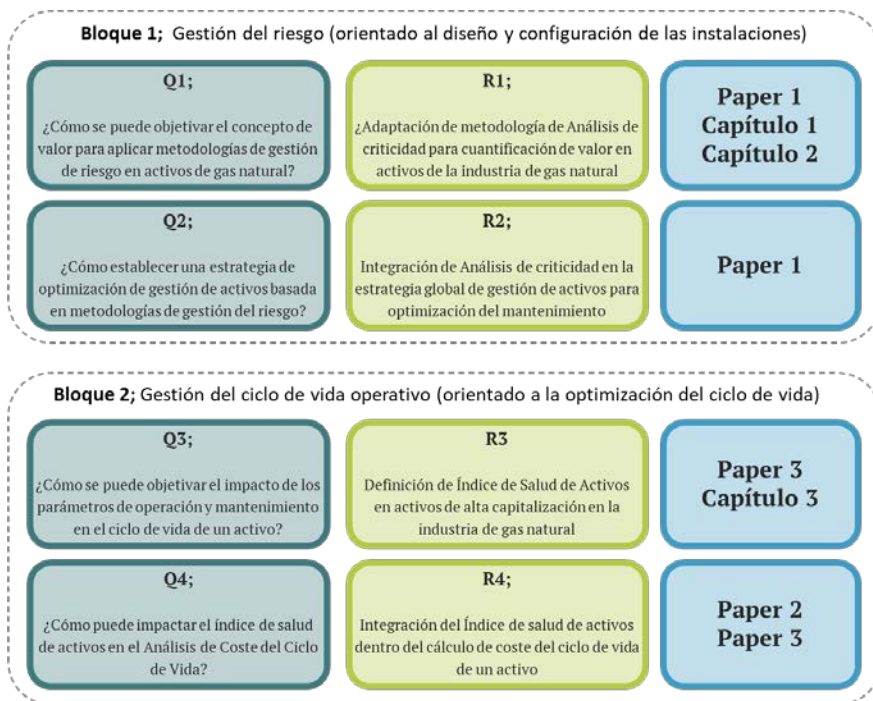


Figura 1; Estructura de la tesis

## 1.3 Contexto empresarial

Es importante para comprender las motivaciones del trabajo de investigación, explicar brevemente la empresa en la que se ha desarrollado la aplicación práctica de las metodologías estudiadas en la tesis. Para ello se presentará de manera breve la empresa, así como el proceso de transformación de su modelo de gestión de activos.

### 1.3.1 Enagás<sup>1</sup>

Con más de 50 años de experiencia en el segmento de transporte de energía, Enagás se posiciona como un referente a nivel internacional en el desarrollo y mantenimiento de infraestructuras gasistas y en la operación y gestión de redes de gas. Desde Enagás, se ofrecen servicios en los ámbitos de redes de transporte de gas natural, plantas de regasificación y almacenamientos subterráneos respresentados en la Figura 2.



Figura 2; Cadena de valor del Gas Natural

Como operador de transporte de energía (midstream) integrado, juega un papel clave para aumentar la eficiencia y la flexibilidad, gestionar riesgos, mejorar la competitividad del GN como materia prima y garantizar la seguridad de suministro. Enagás es el gestor técnico del Sistema Gasista Español y principal transportista de GN. La compañía cuenta en España con más del 90% de los

<sup>1</sup> La información presentada en el siguiente apartado está recogida de la web corporativa con fecha de enero de 2022

gasoductos de alta presión, está presente en seis de las siete plantas de regasificación de la Península Ibérica (cuatro terminales en propiedad cien por cien y dos participadas) y tiene tres almacenamientos subterráneos.

Se presentan a continuación los 3 grandes tipos de infraestructuras que opera y mantiene Enagás:

- **Plantas de Regasificación:** Cabe destacar que Enagás es una de las compañías con más terminales de GNL en el mundo. Es pionera en el desarrollo, mantenimiento y operación de estas infraestructuras y su conocimiento y experiencia la ha posicionado internacionalmente como líderes en el sector. Sus plantas de regasificación aportan además un valor añadido por su posición geoestratégica en el mercado global de GNL. Están situadas en las cuencas atlántica, cantábrica, mediterránea y del pacífico, lo que favorece el transporte marítimo y la diversificación de orígenes y destinos del GNL.
- **Red de Transporte de GN:** En términos de transporte de gas, Enagás ha construido y opera más de 12.000 kilómetros de gasoductos de alta presión. El amplio know-how adquirido en España le ha permitido exportar su conocimiento a los mercados internacionales, donde está trabajando en diferentes proyectos. El sistema gasista en Europa está interconectado entre España, Francia, Portugal y el norte de África a través de conexiones internacionales.
- **Almacenamientos Subterráneos:** Enagás gestiona los tres principales almacenamientos subterráneos de GN en España. Estas instalaciones permiten ajustar la oferta a la demanda, hacer frente a las puntas de consumo y equilibrar el balance comercial de las comercializadoras en la red de transporte.

Toda la experiencia acumulada por los profesionales de la compañía ha posibilitado que la compañía se sitúe a la vanguardia en términos de tecnología y eficiencia, alcanzando cifras destacadas en indicadores como los siguientes:

- 100% de disponibilidad en todas las terminales de GNL desde su puesta en marcha
- Ratio medio de carga de buques superior a 3.000 m<sup>3</sup>/h en todas las plantas
- Cero pérdidas operacionales de boil-off en operaciones de carga de buques



- Coeficiente mínimo de mermas en operaciones en plantas GNL
- Máxima flexibilidad sin penalización en el proceso de asignación y ajuste de slots para descarga y carga de buques
- Terminales preparadas para recibir los buques de GNL más grandes del mundo Q-Max de hasta de 266.000 m<sup>3</sup> GNL
- Gestión íntegra de 3 Almacенamientos Subterráneos, con capacidad total de inyección de más de 18 millones de m<sup>3</sup> (n) y distintas configuraciones geológicas
- Experiencia en la operación y mantenimiento de 18 Estaciones de Compresión, con tecnología de distintos fabricantes y disponibilidad superior al 99% en toda su vida operativa.

### 1.3.2 Reto Profesional en Gestión de Activos

La gestión de activos es el concepto principal que da cobertura a los estudios que se presentan en este trabajo. La incorporación de este concepto como elemento clave en la industria es ya un hecho asumido por la mayoría de organizaciones (1). Las metodologías sobre las que se trabajará en la tesis tienen un impacto más directo en el ámbito de mantenimiento y por tanto es común que tanto internamente (en Enagás) como externamente, se utilicen casi de igual manera los términos de Gestión de Mantenimiento o Gestión de activos. Puede que a lo largo de la exposición se haga referencia a ambos conceptos, pues cuando se comenzó este proyecto, se incluía dentro de lo que se llamó una revisión del MGM (Modelo de Gestión de Mantenimiento). Sin embargo, como ha ido demostrando esa visión más integral de la gestión de activos, es difícil dibujar fronteras entre los diferentes ámbitos que comprometen el ciclo de vida de un activo. No hay actividad en la operación que no tenga impacto en mantenimiento, y viceversa. Así pues, la gestión de activos, entendida como los mecanismos de gestión que intervienen de manera técnica en el ciclo de vida de un activo, son hoy en día uno de los aspectos clave en la dirección de empresas industriales (2).

Si bien no es un área especialmente atractiva desde el punto de vista académico, y mucho menos desde el punto de vista social (poca gente tiene por vocación trabajar en mantenimiento), desde una perspectiva empresarial cada vez son más las

estrategias, las organizaciones y los planes de acción que enfocan sus líneas de trabajo en torno a la gestión del mantenimiento, ya que ha pasado a posicionarse como elemento clave dentro de las empresas (3).

A pesar de existir una gran cantidad de bibliografía, en algunas recopilaciones realizadas por expertos como el presidente de la Asociación Española de Mantenimiento (4), se ha concluido que durante el siglo XX han existido tres grandes etapas en la evolución de la gestión del mantenimiento, y que si bien no podría definirse una frontera temporal clara entre ellas (ya que esto depende mucho del tipo de industria y del país en cuestión), si pueden dar una idea de cuál ha sido la evolución en la forma de pensar que ha hecho que el concepto de gestión de mantenimiento haya cambiado tanto a lo largo de los años.

En la primera etapa o generación, las empresas se centraban en el término “eficacia”. El objetivo era optimizar los tiempos operativos y por tanto la búsqueda directa de maximizar la producción. Eran épocas en las que no existía tanta competencia y por tanto no había que buscar una contención excesiva de costes. Ni siquiera la calidad era un factor distintivo. Eran épocas de crecimiento de las industrias con una gran necesidad de copar mercado. Cuanto más se producía, más se vendía. Sin centrarse en ningún otro parámetro, se derivaba en una ejecución del mantenimiento puramente reactivo. Los equipos eran llevados hasta el extremo en su funcionamiento evitando cualquier tipo de parada por mantenimiento hasta que se daban síntomas de avería, en cuyo momento se actuaba y reparaba para continuar con el proceso productivo cuanto antes. El equipo de mantenimiento no tenía por tanto una entidad significativa y se dedicaba fundamentalmente a reparar aquello que se estropeaba. Era por tanto un coste que había que asumir como mal menor para el funcionamiento de los activos.

En la segunda etapa o generación es en la que comienza el concepto de gestión de mantenimiento propiamente dicho. Se empiezan a copar los mercados y comienzan a surgir competidores y por tanto el concepto en el que se centran las estrategias es el de “eficiencia”. Independientemente de las acepciones recogidas oficialmente, en un entorno industrial, eficiencia es hacer de los costes una ventaja competitiva y por tanto comenzar a mirar el equipo no sólo como una máquina que se estropea, sino como un activo a mantener y garantizar una vida útil significativa. Conseguir los resultados esperados, a un coste óptimo. Se comienza con la definición de planes de mantenimiento preventivo que garanticen el funcionamiento de la máquina en el momento designado y por tanto el área de mantenimiento comienza

a ser una entidad con un presupuesto económico que gestiona y que trata de optimizar para el funcionamiento de sus equipos.

En la tercera etapa o generación comienza el concepto de gestión de activos. Las empresas ya no sólo buscan maximizar la disponibilidad optimizando su coste, sino que buscan hacerlo con un riesgo asumible. Y la gestión de este riesgo es la que define esta nueva etapa. Hay muchos nuevos conceptos que han crecido en torno a cumplir esta tercera vertiente del mantenimiento: la búsqueda de la excelencia operacional, conseguir ser “best in class” en la industria (5), o el mantenimiento integrado total. Todas ellas tratan de resumir que, manejando la disponibilidad, el coste y el riesgo, se pueden definir todas las estrategias de mantenimiento posibles para una industria en concreto tal y como muestra la Figura 3. El objetivo es conseguir que la unidad de mantenimiento pase a aportar valor a la organización y no ser considerado un centro de coste (6).

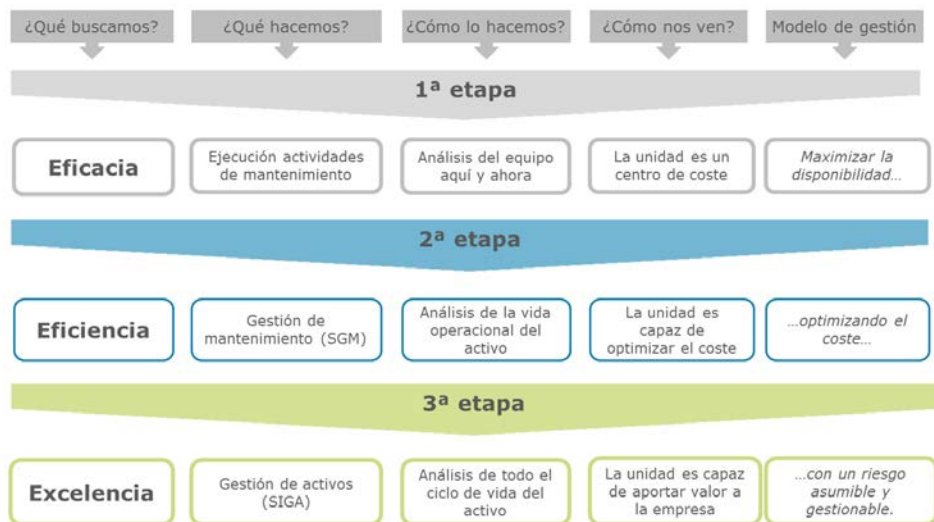


Figura 3; Evolución aspectos clave de la gestión de mantenimiento

Puede que la visión presentada pueda parecer un tanto obsoleta, teniendo en cuenta que estamos en el tiempo de la industria 4.0. La que se está llegando a denominar 4ª Revolución Industrial, tiene por supuesto su impacto en mantenimiento, con el también llamado Mantenimiento 4.0. Esta nueva evolución viene marcada por una serie de aspectos que no van a ser ajenos al trabajo desarrollado en esta tesis, pero que no son el foco principal. El Mantenimiento 4.0

tiene un marcado carácter digital, a través la implantación de nuevas tecnologías en toda la cadena de valor de la gestión del mantenimiento; monitorización, almacenamiento, y tratamiento de información entre otros aspectos. Enagás tiene su propia hoja de ruta digital a nivel corporativo, y a nivel específico de gestión de activos. Y las metodologías trabajadas en la tesis doctoral, como se verá a lo largo del documento, están integradas en los sistemas corporativos en arquitecturas similares a las que podrían incluirse bajo la denominación de Mantenimiento 4.0. Sin embargo, el origen y motivación de la presente investigación, fue integrar de manera efectiva los conceptos de riesgo y ciclo de vida, conceptos que se enmarcan dentro de evoluciones previas.

Así pues, y retomando la visión recogida en la Figura 3, Enagás no ha sido ajena a todas estas etapas. Como toda empresa industrial ha ido atravesando todas y cada una de ellas según la madurez que la empresa y el sector gasista han ido dictando. El alcance de la presente tesis se centra en el análisis, adaptación e implantación de metodologías que han permitido una implantación total de una estrategia orientada a una 3ª etapa de las anteriormente descritas, es decir, una estrategia que una vez garantizada la disponibilidad de los activos y con unos ratios de eficiencia en costes que son líderes en el sector de “Oil & Gas” se centra en la gestión del riesgo garantizando que todas las medidas implicadas en las decisiones de mantenimiento tienen una base técnica basada en un probabilidades y consecuencias. Se garantiza así la sostenibilidad de las políticas y que el modelo sea exportable a otras empresas. Parte de esa implantación tiene una relación directa con el desarrollo de las metodologías que son alcance de la tesis.

El reto al que se enfrentaba Enagás y que motiva el proyecto del que surge la línea de investigación, era la necesidad de revisar en profundidad el modelo de gestión que tenía en ese momento (el que existía en torno a 2012), para no sólo integrar la gestión del riesgo, sino sentar las bases de modelos más avanzados como el que más adelanté propondría la serie de normas ISO 55000 (7) de gestión de activos. El objetivo del proyecto con el que se comenzó esta andadura, fue revisar todas las actividades de gestión que intervenían en la definición de los objetivos y prioridades de mantenimiento, las estrategias, y las responsabilidades, tal y como se define en la norma de referencia EN-13306:2018 Terminología de Mantenimiento (8).

El reto principal en una empresa tan descentralizada físicamente es que la gestión sea homogénea y comparable, y por tanto el proyecto necesita incidir en los dos

procesos básicos en los que puede definirse un modelo de gestión:

- La definición de la estrategia
- La implementación de la estrategia definida.

Como se verá posteriormente, es parte intrínseca a una buena definición de la estrategia, que ésta tenga la posibilidad de ser probada, al menos en modo piloto, ya que durante esa parte del proyecto van a encontrarse condicionantes claves para el devenir de la implantación. Por tanto, las líneas de trabajo se van a diseñar tratando de abarcar ambos conceptos; definición e implantación. Para la definición de la estrategia, se parte de un modelo más teórico, y una visión más holística de lo que supone la gestión de activos en una empresa de infraestructuras. Sin embargo, el análisis de los procesos de implementación son los que van a dar una dosis de realidad y practicidad a todo el trabajo previo (9).

En cualquier caso, no se quiere parar ahí, sino que se mostrarán los primeros pasos de la implementación práctica, pues de nada sirve una buena estrategia si no obtiene los resultados esperados. Tan importante es la definición como la ejecución, pues no sólo de teoría y estrategia viven las empresas, sino más bien de resultados, beneficios y liderazgo en el sector. Así pues, se pretende, mediante dos metodologías concretas, recorrer los eslabones esenciales en la cadena de valor de gestión de activos tal y como la representa el IAM (Institute of Asset Management) en la Figura 4. Se van a tratar muy directamente aspectos relacionados con el riesgo y el ciclo de vida, y como éstos van a tener un impacto en la toma de decisiones. De hecho, así se han estructurado los dos bloques de línea de investigación y resultados mostrados en el presente documento. También se hará referencia a la importancia de la información de los activos, si bien no es el foco de la investigación. Se pondrá de manifiesto la importancia entre la integración de los objetivos de mantenimiento y de la compañía (10), de manera que la gestión de activos pueda aportar valor a los procesos clave de la compañía.

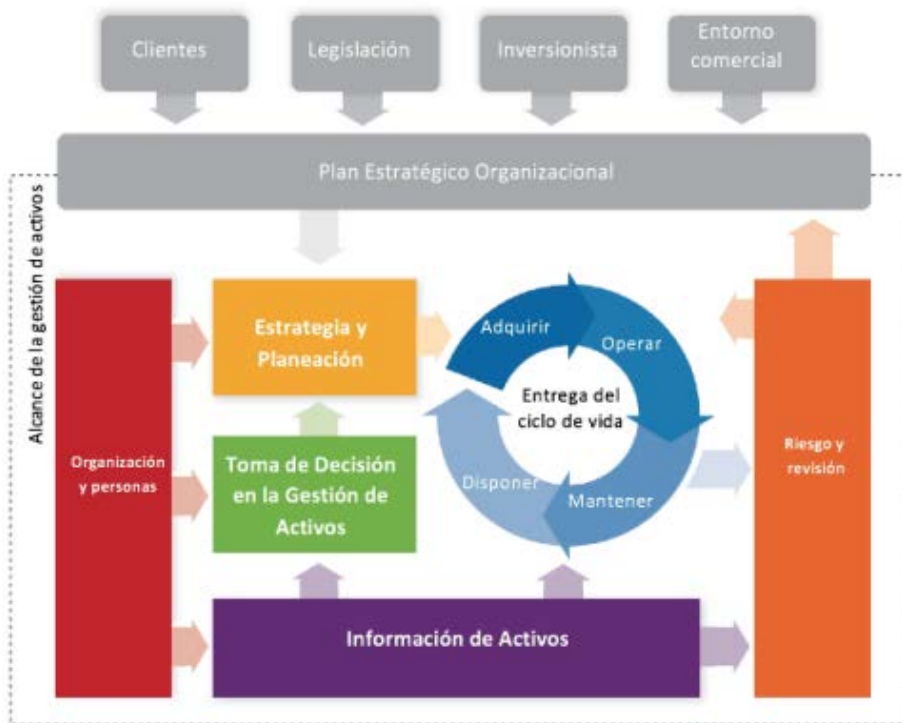


Figura 4; Modelo conceptual de la gestión de activos del IAM

Estrategía, táctica y buena operativa, permiten eficacia a la vez que eficiencia en la gestión, conseguir los objetivos del negocio utilizando una cantidad razonable de recursos. Gestionar el mantenimiento de los activos requiere por una parte comprender bien qué requiere el negocio de ellos, por otra identificar las necesidades que la organización de mantenimiento demanda para poder hacer frente a esos requisitos y finalmente implementar una estrategia por activo que permita su gestión eficaz y eficiente (11). Tratar de alinear esta parte estratégica representada en la Figura 5, va a ser parte capital en el proyecto de Enagás, y va a ser una base fundamental para la aplicación real de las metodologías, como más adelante se verá en los resultados de la tesis.



Figura 5; Obtención y control de la estrategia por activo para cumplir con los objetivos del negocio

No se ha centrado la presente tesis en todo el proceso real de implantación digital que sin duda forma parte inherente al proceso y sin el cual no podría hablarse de aplicación efectiva de la metodología. Como se describirá en algunos puntos del estudio, esa capa digital va a dotar a todo el proyecto del eslabon necesario para hablar del concepto de e-maintenance (12), que sin duda tiene suficiente desarrollo para ser objeto de otra investigación, pues todo el proceso de captura, análisis y tratamiento de la información previa para el desarrollo de lo aquí propuesto, tiene una complejidad y análisis específico.

### 1.3.3 Compromiso del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Enagás está fuertemente comprometida con la sostenibilidad y de hecho lidera alguno de los índices de comparación más relevantes en su sector, como es el DJSI (Dow Jones Sustainability Index). Dentro de esta firme convicción, todos los proyectos tratan de alinearse con la consecución de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), que constituyen una hoja de ruta para todas las empresas e integrantes del planteta de cara a 2030 y que abarcan muchos ámbitos de actuación, que tienen como eje central los derechos humanos fundamentales. Uno de los objetivos de Enagás ha sido identificar y priorizar aquellos ODS a los que se contribuye directamente por las actividades en las que participa como empresa, y que han sido incluidas por tanto en la Estrategia de Sostenibilidad. De manera interna y por el propio funcionamiento de la compañía, a alguno de los objetivos se contribuye por la propia organización que se maneja, como la igualdad de género o el trabajo decente.

Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos



Trabajamos en nuevas soluciones energéticas para lograr una economía baja en carbono, como los gases renovables: biometano e hidrógeno. También, en la eficiencia energética y la reducción de emisiones con la promoción del gas natural en el transporte, entre otros.

Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación



Nuestro propósito es mejorar la competitividad de los países en los que operamos y contribuir al proceso de transición energética y descarbonización a través del desarrollo y gestión de infraestructuras energéticas.

Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos



La eficiencia energética es un ámbito prioritario para Enagás. Continuamos trabajando y estableciendo objetivos de reducción de emisiones y de intensidad energética de cada una de nuestras instalaciones.

Figura 6; ODS a los que contribuye la tesis



Pero es importante para el desarrollo de la tesis, hacer hincapié en aquellos que tienen un marcado carácter industrial y de los que sin duda el desarrollo del trabajo que aquí se expone tiene consecuencias más directas y que se exponen en la Figura 6.

Los objetivos de la presente tesis tratan de manera muy directa el objetivo número 9, mediante la generación de nuevos modelos y metodologías de análisis de gestión de activos que pretenden permitir una gestión más eficiente de los recursos, tanto humanos como materiales. Dichas metodologías permiten poner foco no sólo en optimizar la operación y mantenimiento durante el ciclo de vida estimado, sino trabajando en alargar dicho periodo si fuera posible. De esta manera se contribuye colateralmente a hacer una energía más asequible disminuyendo los costes provenientes de la actividad de transporte (objetivo número 7), y una energía más limpia, cuanto más eficiente es el proceso de transporte de ésta (objetivo número 13).

## 1.4 Colaboración Universidad-Empresa

Como se ha introducido al describir los retos empresariales de la compañía, el proyecto abarca una parte teórica importante de definición estratégica, y una parte eminentemente pragmática que incluye los procesos de implantación de dicha estrategia. Una de las labores clave a la hora de definir el proyecto, sabiendo ya el alcance, fue el equipo encargado de llevarlo a cabo. Cuando se trata de definir un equipo de profesionales que sea capaz de abordar este tipo de desafíos, son muchos los condicionantes que pueden impactar en la configuración del mismo. Todas las posibles configuraciones tienen ventajas e inconvenientes, que pueden ser analizadas en términos de plazo, coste y calidad.

Dentro de las diferentes opciones que se valoraron a nivel de compañía, una de ellas era un proyecto íntegramente interno, donde el pilar fuera la experiencia de más de 40 años de profesionales en el sector. Esta modalidad permitía una gran agilidad y coste casi plenamente interno, pero era difícil garantizar la inclusión de los conceptos y metodologías que el mantenimiento 4.0 traía consigo. Otra posibilidad era la contratación del proyecto a una empresa consultora, que sin duda iba a permitir plazos mucho más agresivos, pero obviando el coste, las empresas consultoras generalistas no tenían experiencia real en implantaciones de modelos de gestión de mantenimiento, ya que era un ámbito relativamente nuevo

para ellas.

Así pues, finalmente se entendió, que siempre que hubiera experiencias previas que validaran su valía, la colaboración con la Universidad era la solución más equilibrada. La investigación y los modelos avanzados que se proponen en diferentes estudios presentados en tesis doctorales son una base perfecta de metodologías al servicio de la estrategia de mantenimiento. Los especialistas de Enagás son los encargados de poner realidad a lo propuesto. Y el alcance de esta tesis es precisamente el tercer eslabon que trata de traducir y poner en entendimiento al mundo académico con el mundo industrial. Ese ha sido la principal aportación de la tesis y sobre la que versan las principales cuestiones y resultados de la misma. Ser capaz de trabajar en la adaptación de metodologías al sector para garantizar una implantación efectiva y sostenible de las mismas.

### 1.4.1 Implantación del Modelo de Gestión de Mantenimiento

Ante el reto planteado, y el modelo de trabajo propuesto con una colaboración entre Universidad y Empresa, en el año 2012, Enagás plantea a Ingeman la posibilidad de trabajar juntos para conseguir un modelo de gestión de mantenimiento que, desarrollando de manera práctica los objetivos planteados para el negocio, permitiese alcanzar la excelencia en la gestión de los activos, conforme la visión de la empresa como líder mundial en gestión de infraestructuras gasistas.

Ingeman plantea como propuesta el MGM (Modelo de Gestión de Mantenimiento) propuesto por el profesor Crespo (13), e implantado ya en otras compañías. Uno de los principales atractivos para la elección de dicho modelo, es que se muestra de una manera muy sencilla y visual cuales son los diferentes pasos a ejecutar para la implantación del MGM. Tal y como se muestra en la Figura 7, el modelo consta de 8 fases con líneas de trabajo concretas, agrupadas en 4 fases con objetivos concretos sobre el ámbito de gestión de activos.

Como puede verse, los 4 bloques principales son *eficacia, eficiencia, optimización e integración y mejora continua*. Estos son los 4 aspectos estratégicos en los que se agrupan las diferentes fases y que vehiculan los objetivos a conseguir por cada una de ellas en el ámbito del mantenimiento:

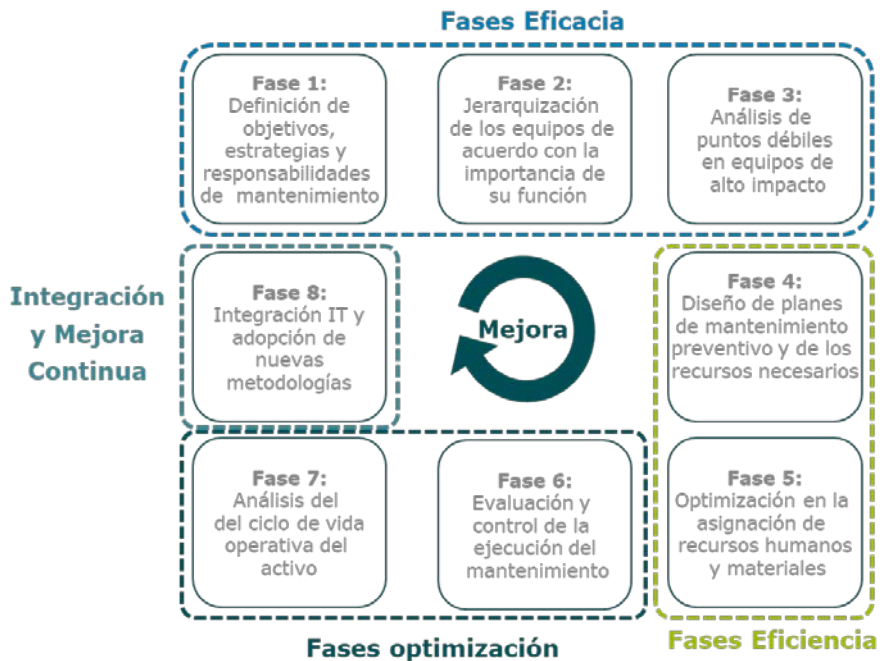


Figura 7; Modelo de Gestión de Mantenimiento

- *Eficacia:* No cabe duda de que el principal indicador que muestra el éxito de un proceso es el que muestra el cumplimiento de los objetivos perseguidos, y por tanto la eficacia del proceso. Asegurar este ámbito va a ser el objetivo de las 3 primeras fases del modelo. Así pues, se va a seguir una lógica que posteriormente se describirá con mayor extensión pero que consta de definir unos objetivos, darles una importancia relativa a la organización, y asegurar que no existen grandes impedimentos para su cumplimiento.
- *Eficiencia:* Comprende las fases 4 y 5. Una vez implementada una política eficaz con los objetivos perseguidos, el siguiente reto es tratar que esa política se pueda implantar con el mínimo empleo de recursos posible. Se trata pues, de tratar con las fases de este bloque, una optimización del mantenimiento. Esta optimización abarca el ámbito de planificación con unos correctos planes de mantenimiento, y de actividades de soporte a dicho mantenimiento, como la contratación o la gestión de almacenes.

- *Optimización:* Se incluyen las fases 6 y 7 y establece los mecanismos de control de las políticas de mantenimiento. No se está proponiendo sólo un seguimiento estricto de los KPI's sino también un seguimiento desde un punto de vista más técnico. Hoy en día ya no hay duda de que el seguimiento y control de los datos y la información es el punto de partida objetivo necesario para un modelo de mejora continua. No se pueden establecer mejoras en la gestión, sin conocer la eficacia de los procesos que se están implantando. Se hará desde un punto de vista de procesos, y desde un punto de vista más técnico en los activos más relevantes.
- *Integración y Mejora continua:* por último, se debe garantizar una integración efectiva del modelo en la organización, y asegurar que se genera un proceso de mejora continua. Generalmente se va a basar en la digitalización de los procesos clave en las herramientas digitales, así como la asunción de nuevas metodologías de mantenimiento avanzado como la inteligencia artificial (14).

Se han descrito los objetivos de los bloques principales. A continuación, se explica brevemente de que consta cada fase y que objetivos se persiguen en cada paso específico:

- *Fase 1: Definición de los objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.* Si bien puede ser un objetivo excesivamente obvio, no es difícil encontrarse con diferentes objetivos en la mente de diferentes integrantes de un mismo proyecto. Así pues, se persigue definir y acordar los objetivos del departamento de mantenimiento, así como conocer como se va a realizar el seguimiento del cumplimiento de los mismos. Va a permitir sentar las bases del proyecto, y en como éste encaja en los objetivos globales de la organización.
- *Fase 2: Jerarquización de los equipos de acuerdo con la importancia de su función.* Este va a ser uno de los pasos claves para el resto de fases del proyecto, ya que na vez definidos los objetivos del mantenimiento, se necesita una metodología que permita conocer la importancia relativa de los activos para la organización, de cara a una correcta priorización de los recursos. Para conseguir la eficacia y eficiencia en el área de mantenimiento es clave saber donde hay que centrar esfuerzos, y donde estos pueden ser menos necesarios. La jerarquización va a permitir realizar esta priorización de

acuerdo a los objetivos definidos previamente.

- *Fase 3: Análisis de los puntos débiles en equipos de alto impacto.* En base a los resultados previos, el objetivo esencial a la hora de revisar el modelo de gestión de mantenimiento, será asegurar que la revisión de procesos no impacte en los equipos críticos. Así pues, se buscará asegurar que no existan incidentes en los equipos clave de las instalaciones.
- *Fase 4: Diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios.* Asumiendo que gran parte de las organizaciones tienen planes de mantenimiento optimizables, se plantean una serie de metodologías para pasar de un modelo de gestión único de la instalación a un modelo basado en riesgo. Las políticas de mantenimiento de cada activo se revisarán en función de la criticidad del mismo.
- *Fase 5: Programación del mantenimiento y optimización de la asignación de los recursos.* El objetivo de esta fase es revisar los procesos de soporte directo a la gestión de mantenimiento, especialmente los almacenes y la contratación. De esta manera se busca ser eficiente en tareas que sin ser core, son clave para la ejecución del mantenimiento.
- *Fase 6: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.* Se centra esta fase en la definición de los indicadores necesarios para medir y controlar el cumplimiento de las fases previas de manera que pueda a partir de aquí generarse de manera objetiva el plan de mejora de procesos.
- *Fase 7: Análisis de ciclo de vida y de la posible renovación de los equipos.* Si mediante las fases previas se trata de garantizar un correcto mantenimiento durante la vida útil, se pretende con la fase 7 optimizar este ciclo de vida. Se trata de medir de manera técnica y económica como impactan los diferentes aspectos operativos en el ciclo de vida permitiendo objetivar conceptos que ayuden a tomar decisiones en activos de alta capitalización.

- Fase 8: Implementación del proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías.* Se agrupan en esta fase todos los aspectos relacionados con integrar tecnología a los procesos de manera que estos sean lo más automáticos e inteligentes posible. Además, debe garantizarse la continua reevaluación de la eficacia del MGM para poder cerrar el ciclo de mejora. Llegados a este punto la empresa debe buscar soluciones innovadoras (15) que permitan alcanzar los objetivos perseguidos y ayuden a dar un salto cualitativo en las políticas de mantenimiento.

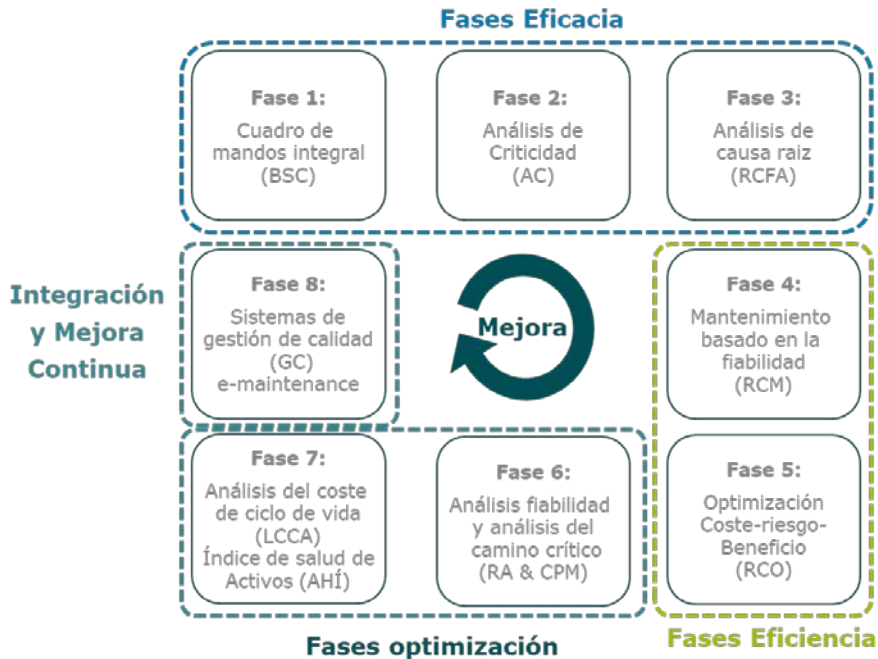


Figura 8; Metodologías propuestas en el MGM

Previamente se describía la sencillez de la exposición de los objetivos como uno de los factores relevantes para la elección del MGM. Sin embargo, existe un segundo factor que muestra un valor añadido al respecto de otros modelos que se pueden encontrar. Para cada una de las fases, el modelo propone la metodología de gestión que a juicio de los autores tiene un mayor impacto para conseguir los objetivos específicos de dicha fase. No es un tema menor, pues si bien con los objetivos nos

movemos en la parte más estratégica, con las metodologías nos movemos en el ámbito más práctico y de aplicabilidad de las mismas. Desde un punto de vista académico puede que la importancia de este punto sea relativa, sin embargo, desde el ámbito industrial, es determinante. Las metodologías propuestas se muestran en la Figura 8. Como se verá a continuación, no todas las metodologías son directamente aplicables, así que habrá que analizar el impacto que puede tener en la organización.

## 1.4.2 Adaptación del MGM al sector del Gas Natural

Una de las primeras consideraciones a la hora de diseñar un proyecto de integración de un modelo de gestión técnico como el que propone el MGM, es que requiere de una adaptación al sector en el que se implanta. Si bien los objetivos y metodologías son esencialmente comunes a todas las industrias y tipos de infraestructuras, la forma de definir e implantar las mismas no son extrapolables de un sector a otro.

Ha sido por tanto una de las características principales del proyecto la adaptación del modelo al sector, derivado de lo cual se ha generado un producto conjunto entre Ingeman y Enagás denominado MGM-GAS. No es más que el resultado del camino que la colaboración entre ambas organizaciones han llevado desde el 2012. Ser capaces de haber definido y procedimentado las metodologías propuestas para el sector específico, hace que sea extrapolable y aplicable de manera tremendamente ágil a otras empresas con activos de gas natural. Como se verá posteriormente, el objetivo del desarrollo del MGM-GAS no es puramente comercial. Existe una profunda vocación de generar un estándar que pueda ser reconocido por todos los agentes del sector y que facilite el intercambio de conocimiento y experiencias entre los profesionales de la gestión del mantenimiento.

De la misma manera que se realiza en el MGM, se han parcelado cada uno de los objetivos con sus metodologías, parametrizando el proceso para el sector, y dando las guías principales para que pueda ser integrado en la herramienta IT correspondiente, esencialmente el sistema GMAO (Gestión Mantenimiento Asistido por Ordenador) corporativo. La representación gráfica del MGM-GAS puede verse en la Figura 9.

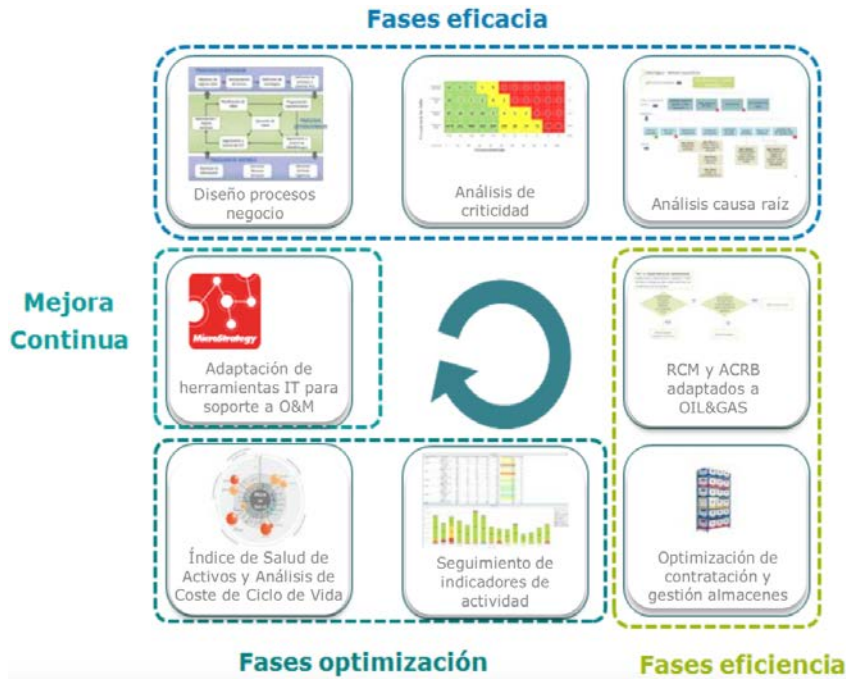


Figura 9; Representación del MGM-GAS

El desarrollo de la presente tesis se va a centrar en el análisis, adaptación e implantación de dos de las metodologías directamente propuestas por el MGM-GAS. En concreto se va a trabajar sobre:

- Análisis de criticidad para la gestión del riesgo.
- Índice de Salud de activos para la gestión del ciclo de vida.

Se va a desarrollar por tanto el alcance propuesto para las fases II y VII del MGM. Sin embargo, tal y como se va a poder ir descubriendo a lo largo de la explicación, no puede hacerse sin tener en cuenta todo el proceso global, ya que de manera directa o indirecta va a tener relación con todas y cada una de las fases del modelo. En algunos casos porqué los resultados proporcionados por la aplicación de las metodologías van a condicionar como se gestione el modelo, y en otros casos porqué la definición de ciertos criterios va a ser común para todo el MGM-GAS.



## 1.5 Conclusiones

Nos encontramos pues, con la investigación realizada en la tesis, ante el desarrollo de dos de las piezas claves para un proyecto de mucha mayor envergadura como es la implantación de un modelo de gestión global de activos. Son más las metodologías de gestión de mantenimiento que se han adaptado e implantado en la compañía, pero las dos escogidas para la investigación han sido aquellas que estratégicamente más valor tenían. Su implantación, no ha implicado meramente la ejecución de una técnica. Realizar un Análisis Causa Raiz (ACR) y revisar un plan de mantenimiento mediante la metodología de mantenimiento centrado en fiabilidad (RCM), no deja de ser un proceso casi independiente del sector o industria en el que se realice. Sin embargo, las escogidas para la tesis deben realizar un proceso de adaptación al sector y por tanto se genera la necesidad de validar su aplicabilidad.

Mediante el análisis y adaptación del análisis de criticidad, se van a sentar las bases de la gestión del riesgo. La definición de los diferentes criterios que la metodología contiene, va a traducir los objetivos corporativos en objetivos de gestión de mantenimiento y van a ser claves para las fases que se apoyan en la valoración relativa que salga como resultado de la fase II. El índice de salud de activos va a poner foco en los equipos de alta capitalización para optimizar su ciclo de vida y los costes operativos asociados a dichos equipos.



## 2. OBJETIVOS DE LA TESIS

---

Cada vez está más asumido por la industria que el mantenimiento, al igual que otros ámbitos directamente relacionados con la gestión de activos, van a estar basados en la monitorización de los parámetros de los activos y el uso inteligente de los datos tomados. Desde un punto de vista puramente conceptual, los sistemas tienen capacidades que hoy en día exceden aquello que se puede necesitar de ellos, situándose el problema en cómo las empresas son capaces de utilizarlos (16). Hacer aplicable una metodología, o integrar ésta dentro de una estrategia, son los principales retos para hacer que el denominado mantenimiento 4.0 sea una realidad en las empresas (17). Así pues, y con estas condiciones de contorno, se resumen el objetivo principal de la tesis, así como los objetivos relacionados

Objetivo principal:

- Integrar las metodologías de gestión de mantenimiento en la estrategia de operación y mantenimiento de activos de alta capitalización.

Para la consecución del objetivo principal, se proponen otros objetivos particulares que doten una línea argumental al trabajo presentado:

- Analizar de manera integral del modelo de gestión de mantenimiento, identificando en que partes del ciclo de mejora continua tiene sentido el uso de estas metodologías
- Seleccionar que metodologías aportan más valor al integrarlas en el modelo de gestión, teniendo en cuenta su simplicidad metodológica, eficacia de los resultados, y eficiencia en su aplicación.

- Adaptar dichas metodologías a la industria del gas natural, ya que cada tipo de negocio tiene unos objetivos y particularidades, que especialmente en este tipo de procedimientos, es necesario tener en cuenta.
- Validar la adaptación metodológica mediante la aplicación real en un activo de la compañía.
- Integrar las metodologías en el modelo de gestión integral de la compañía.
- Desarrollar las metodologías en herramientas de IT, de manera que el proceso se integre de una manera formal y sostenible en la operativa diaria de las infraestructuras.

# 3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

---

**E**n este apartado se realiza un resumen con los resultados derivados de las aportaciones de la tesis. Se pretende establecer la relación directa entre las cuestiones que originan las líneas de investigación con los resultados obtenidos. Es importante recalcar que debido al marcado carácter industrial de la tesis, gran parte de los resultados se basan en las adaptaciones y validaciones de determinadas metodologías de gestión de mantenimiento a la industria del gas natural. Posteriormente se trata de validar el impacto perseguido analizando las conclusiones de ambos procesos, así como los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos por la compañía a raíz de dicha implantación.

Así pues, y atendiendo al modelo de gestión que se persigue analizar y validar, la presentación de resultados se ha estructurado en dos bloques:

- *Bloque 1: Gestión del riesgo basada en criticidad;* Se presentarán en este bloque los resultados derivados de la adaptación e implantación de la metodología de análisis de criticidad en activos de gas natural. También se presentará un modelo de gestión de mantenimiento propuesto, en el que, partiendo de los resultados del análisis de criticidad, se pueda establecer una estrategia de optimización de mantenimiento que permita maximizar los beneficios con un esfuerzo razonable de la organización. Se presentarán los principales resultados derivados de la aplicación de esta estrategia en la compañía.
- *Bloque 2: Gestión del ciclo de vida operativo;* Si bien el bloque 1 era el objetivo original de la tesis, derivado de la implantación de la estrategia propuesta

en dicho bloque, se detecta la necesidad de hacer foco en el ciclo operativo de los activos de alta capitalización. Para ello, y de manera análoga al bloque anterior, se va a realizar una adaptación y validación de la metodología de índice de salud de activos para la industria de gas natural. Se mostrará cómo se ha integrado dicha metodología en el modelo operativo de la gestión de infraestructuras y como se está utilizando para la optimización del ciclo de vida.

### 3.1. Bloque 1: Gestión del riesgo basada en criticidad

El presente bloque fue el origen de la investigación de la presente tesis, siendo complementado con el bloque 2 debido a la evolución que sufrió el proyecto en la compañía. El reto al que se enfrentaba la compañía era generar una base sólida para integrar de manera efectiva un modelo de gestión de mantenimiento basado en riesgo, según requerían los nuevos estándares de calidad de la ISO 9001 (18) o incluso los propuestos por nuevas certificaciones como la ISO 55001 (7).

Así pues, existían dos retos fundamentales a los que se trataba de dar respuesta con la línea de investigación resumida en este bloque 1:

- Pregunta 1 (Q1); ¿Cómo se puede objetivar el concepto de valor para aplicar metodologías de gestión de riesgo en activos de la industria del gas natural?
  - En el resultado 1 (R1) se procederá a la adaptación de la metodología de análisis de criticidad a activos de gas natural y se mostrará de manera detallada un ejemplo práctico para tratar de mostrar de manera muy esquemática el proceso realizado en la compañía para la ejecución del análisis de criticidad
- Pregunta 2 (Q2); ¿Cómo establecer una estrategia de optimización de gestión de activos basada en metodologías de gestión del riesgo?
  - En el resultado 2 (R2) se procederá a presentar una propuesta de uso de la metodología de análisis de criticidad como base de otra serie de herramientas y metodologías de gestión de mantenimiento. Esta propuesta es una estrategia global de optimización del mantenimiento basada en riesgo y aplicada de

manera efectiva en la compañía.

Para una mayor comprensión del proceso de investigación y consecución de resultados por parte del doctorado, se ha generado la Tabla 1 de relación. En ella, se trata de mostrar de una manera simple y esquemática la relación entre los diferentes resultados que se muestran en este primer bloque, con los objetivos y las publicaciones que lo sustentan. El objetivo es permitir una mayor comprensión de como se ha seguido la metodología y facilitar la trazabilidad de los resultados.

Resultados del bloque I	Paper	Capítulos
R1 Adaptación de metodología de análisis de criticidad para cuantificación de valor en activos de la industria de gas natural	Paper 1	Capítulo 1 Capítulo 2
R2 Integración de análisis de criticidad en la estrategia global de gestión de activos para optimización del mantenimiento	Paper 1	

Tabla 1; Relación de resultados de bloque I con publicaciones

### 3.1.1. Adaptación de metodología de análisis de criticidad para cuantificación de valor en activos de la industria del gas natural

#### 3.1.1.1. Consideraciones previas. Marco de aplicación

Uno de los principales retos a los que se enfrentan las empresas que gestionan infraestructuras es la capacidad de objetivar en la medida de lo posible la toma de decisiones. No se habla estrictamente de automatizar criterios de decisión, pero si de apoyarse en metodologías que delimiten claramente los ámbitos en los cuales determinadas decisiones ya están acordadas de manera corporativa, y por tanto se limita el factor técnico a la evaluación de aspectos dentro de dicho marco de reglas. Así pues, y con la premisa descrita en la introducción de la necesidad de establecer una estrategia de mantenimiento basada en riesgo, se procede al análisis y

evaluación de la metodología de análisis de criticidad como metodología semicuantitativa que de soporte a dicha gestión (19).

El propósito del presente resultado (R1) es establecer una base para un análisis de criticidad, considerado aquí como un primer paso necesario para revisar los planes de mantenimiento actuales de activos industriales en servicio (20). El objetivo es por tanto validar la capacidad de la metodología de responder a las expectativas de negocio, no sólo en cuanto a la validez de los resultados, sino también en la capacidad real de desarrollar el proyecto de manera eficiente en la compañía.

Se trata por tanto de abordar la parte estratégica de la definición y el proceso de gestión del mantenimiento según se define en la norma EN13306:2018 (8), que está relacionada con la definición de los objetivos o las prioridades de mantenimiento y la definición de las estrategias. Posteriormente habrá una segunda parte de la definición, más operativa, que se referirá a la implementación de la estrategia (planificación, control, supervisión y mejora continua). En este contexto, se busca con el análisis de criticidad, definir un proceso que proporcione una base sistemática de decisión para priorizar unos activos frente a otros en los planes de mantenimiento (21). Esta priorización se ha convertido en una clara necesidad empresarial para maximizar la disponibilidad durante la fase operativa de los activos. Este tipo de análisis de criticidad de los activos, realizado durante la fase operativa y con fines de mantenimiento, es, por tanto, diferente del análisis de criticidad que pueda llevarse a cabo en fases de diseño, o por otras áreas funcionales como el área de seguridad. Durante el diseño existen técnicas de referencia que se pueden encontrar en MIL-STD-1629A (22), también en el trabajo de Heerel (23) y Pillay y Wang (24).

Si se habla de priorizar los activos con fines de mantenimiento, se puede encontrar en la bibliografía numerosas técnicas cuantitativas y cualitativas (25) (26). En función del grado de detalle con el que se quiera obtener la priorización, y los datos e información previa de los que se pueda partir para el estudio, se puede tender a metodologías puramente cualitativas. Son usadas especialmente cuando no hay un histórico de calidad del que partir, pero la organización requiere una aproximación a alto nivel de priorización de activos. En estos casos, se puede utilizar un primer análisis cualitativo, que permite comenzar a construir una planificación de mantenimiento de manera razonablemente efectiva (27).

Sin embargo, existe una casuística concreta en la que puede aplicarse metodologías



más específicas. En el caso que nos ocupa, se busca una metodología que pueda obtener un gran valor en organizaciones que disponen de un histórico de datos de activos en servicio en los que se ha llevado con anterioridad una estrategia concreta de mantenimiento. En consecuencia, se dispone de evidencias del comportamiento del activo para las condiciones operativas del mismo, y por tanto se persigue ajustar las estrategias de mantenimiento de cada activo a las necesidades del negocio en función de su importancia relativa.

La mayoría de las técnicas cuantitativas actuales para el análisis de criticidad utilizan métodos de puntuación ponderada definidos como una variación del método RPN (Risk Priority Number o número de prioridad del riesgo) utilizado en el diseño (28). Los métodos de puntuación ponderada son aparentemente sencillos, pero para llegar a resultados aceptables se debe considerar un procedimiento preciso a la hora de definir los factores y los valores para combinar los procesos y algoritmos (29). Estos análisis tienen otro factor muy relevante, que es el nivel de detalle requerido, lo que compromete mucho los resultados posteriores y también los esfuerzos de recogida de datos.

Lo que las metodologías persiguen, es obtener un valor de criticidad que permita la priorización y jerarquización de unos activos frente a otros. Este valor de criticidad "C", como valor del riesgo asociado a un activo, proviene de la combinación de la probabilidad de fallo (pérdida de función) del activo, y de las consecuencias hipotéticas que puedan ocurrir derivadas de dicho fallo. Para poder objetivar estos conceptos, se ponderan, asignándoles una serie de valores numéricos que permitan calcular un valor objetivo "C". La definición de los criterios y de la ponderación para evaluar la gravedad y la probabilidad van a variar mucho en las distintas empresas en función del tipo de negocio y los objetivos concretos del área. Los dos valores se multiplican para obtener un tercero, que es el valor de criticidad "C". Así pues se obtiene un primer resultado muy intuitivo, donde los activos con un "C" reflejarán tener una mayor criticidad y merecerán por tanto un foco especial por parte de la organización de gestión del mantenimiento (30).

Se puede observar cómo el factor de detectabilidad, utilizado como parte de la ecuación del RPN en el diseño, no se considera ahora para los cálculos en "C". Esto se debe a que la detectabilidad no es un atributo de los activos que estamos analizando, sino de los modos de fallo para los que se exploraron alternativas de diseño (31). Una vez realizado el análisis, es de suponer que las actividades de inspección y mantenimiento deben priorizarse en función del riesgo cuantificado

que provocaría el fallo del activo en sí (32). Se entiende que los activos de alto riesgo se deben inspeccionar y mantener de manera más minuciosa para mantener unos niveles de riesgo asumibles (33).

Aunque esta técnica goza de cierta popularidad, algunos autores mencionan (32) que este tipo de enfoques de análisis de riesgos son deficientes debido a su incertidumbre. Esto puede limitar la adecuación de los resultados, y por tanto las decisiones derivadas pueden generar esfuerzos de mantenimiento no esenciales en áreas menos importantes. Para evitarlo, el análisis de los riesgos debe evaluarse de forma bien planificada, asegurando que se reduzcan o eliminen las fuentes de riesgo significativas (34).

Así pues, se debe entender que, en la elección concreta de esta metodología como base de la gestión del riesgo, se basa en el equilibrio encontrado entre el detalle y aplicabilidad de los resultados, y el esfuerzo organizacional invertido para conseguirlos. Además, como todo proceso incorporado dentro del modelo de gestión de la compañía, se persigue que dicha inclusión sea sostenible, es decir que dicho equilibrio se mantenga no sólo durante el proyecto de implantación, sino también durante su constante revisión en el proceso de mejora continua en el que se incorpora.

A continuación se pasa a describir los criterios de aplicabilidad que hacen que se haya escogido esta metodología de análisis de criticidad para su aplicación industrial (35), y por tanto en al que se basa la aplicación práctica de la tesis:

- El proceso debe ser aplicable a gran escala. Debe permitir el análisis de una gran cantidad de equipos o sistemas en servicio dentro de una instalación industrial. El motivo es que los programas de mantenimiento preventivo (MP) que se van a evaluar mediante este análisis de criticidad son establecidos a nivel de “ítem mantenible” (nivel mínimo de intervención sobre el que se realizan actuaciones de mantenimiento), y, por lo tanto, el nivel de análisis será de un detalle significativo, lo que derivará en un gran número de elementos a jerarquizar.
- El alcance del análisis debe ser el mismo para el que se desarrolla e implementa el plan de mantenimiento de la compañía, y del que por tanto se tiene histórico.
- El análisis debe admitir cambios periódicos en los diferentes factores que influyen en la escala adoptada para los niveles de severidad de las

pérdidas funcionales de los activos. Este factor es clave para garantizar que la metodología se adapta a la estrategia de mantenimiento en entornos empresariales dinámicos y permitir la sostenibilidad efectiva del proceso.

- El resultado debe permitir la definición de directrices generales que permitan una propuesta de estrategia de mantenimiento aplicable los distintos activos de acuerdo a los resultados del análisis previo (criticidad y factores que la conforman).
- La metodología debería poder integrarse en el mapa de procesos de la compañía de manera que pueda reproducirse automáticamente el análisis, con una determinada cadencia, a lo largo del tiempo.
- El proceso tiene que ser capaz de mostrar buenos resultados prácticos tras aplicaciones reales en la industria.

Como ya se ha descrito anteriormente, es importante entender la metodología como uno de los eslabones necesarios para una revisión integral de la estrategia de gestión de mantenimiento. Es por tanto muy relevante conocer cuáles van a ser los pasos posteriores y cómo van a ser utilizados los resultados del análisis, por lo que hay que entender que tomamos como referencia el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) propuesto por Crespo (13) donde el análisis de criticidad forma parte de la fase 2 del modelo.

El procedimiento en concreto se basa en la metodología denominada método CTR (Criticidad Total por Riesgo), que está basada en los conceptos descritos anteriormente de consecuencia y frecuencia de fallo. Es una metodología categorizada como semicuantitativa, y es en la actualidad de amplia utilización en un número importante de empresas industriales. Destacar que no es alcance de la presente tesis el análisis teórico de la metodología, que se considera previamente probado en base a los resultados de investigación de otros trabajos del grupo de investigación SIM (36).

### 3.1.1.2. Adaptación de la metodología a activos de gas natural

En este apartado se va a describir de una manera comprensiva el proceso que debe seguir un equipo de revisión de criticidad, según lo define Moubray (37). De cara a explicar de manera ordenada como se ha realizado la adaptación de la metodología, se va a describir brevemente los diferentes conceptos que hay que

definir o adaptar y el orden secuencial en el que se presentan:

- *Alcance del análisis;* El primer paso será acotar el activo o instalación al que se va a aplicar la metodología.
- *Nivel de intervención;* Uno de los factores más relevantes a la hora de realizar el análisis va a ser definir el nivel de intervención de éste. Antes se hablaba del equilibrio entre los resultados y el esfuerzo invertido para conseguirlos, y esta es una premisa que va a haber que tener en cuenta en cada decisión, comenzando por saber a qué nivel de detalle se realizan los planes de mantenimiento y por tanto a que nivel hay que analizarlos.
- *Definición de factores de consecuencia;* En los siguientes pasos es donde se van a definir los criterios objetivos de valoración que aportan valor a la metodología. Dentro de esos criterios, los factores de consecuencia serán las áreas de análisis donde se valora el impacto de un hipotético fallo funcional.
- *Ponderación de factores de consecuencia;* Como metodología semicuantitativa, una vez definidos los criterios de análisis, debe existir la posibilidad de dar un valor concreto a dichos criterios. Mediante esta ponderación se definirá la importancia relativa de unos factores frente a otros.
- *Definición y ponderación de los niveles de severidad;* Dentro de cada factor de consecuencia, se va a definir un nivel de severidad que nos va a permitir analizar y cuantificar el impacto de un hipotético fallo funcional en cada uno de los factores, lo que nos permitirá dar una valoración global de “consecuencia”.
- *Definición y ponderación del factor de frecuencia de fallo;* Como se comentaba previamente, la criticidad es el factor resultante de multiplicar la consecuencia por la frecuencia de fallo. En este punto se definirá la escala y ponderación de cada uno de los niveles en los que se trabajará la frecuencia de fallo.

Llegados a este punto, se va a comenzar con la adaptación metodológica en sí. Se van a ir replicando los puntos previamente descritos de manera teórica, mientras se explica que consideraciones se han tenido en cuenta para adaptarlos al sector del GN. Se recuerda que se exponen los conceptos y puntos clave tal y como se han trabajado en la investigación, si bien los ejemplos son ilustrativos y no reflejan los

valores concretos adoptados por Enagás. Con este mecanismo se puede compartir la información y no es necesario que la tesis esté sujeta a confidencialidad.

1. *Alcance del análisis;* hablando del proyecto de implantación de la metodología en Enagás, el alcance del análisis incluye todas las infraestructuras en operación de la compañía de las que es 100% propietario, y de las que por tanto gestiona directamente la operación y el mantenimiento. Es cierto que para validar la adaptación metodológica y analizar el impacto de los resultados, se utilizaron una serie de infraestructuras piloto donde se invertiría más tiempo de análisis y pedagogía para una posterior extensión más rápida y dinámica en el resto de los activos. Pero es importante destacar, que desde el principio se definió que el alcance fuera total. Si bien cada tipo activo puede tener sus peculiaridades (plantas, almacenamientos o gasoductos), esta visión global es crítica a la hora de poder tomar criterios globales y extrapolables a todos los tipos de activos. Es la única vía de garantizar la coherencia de la metodología dentro de la estrategia integral de operación y mantenimiento.
2. *Nivel de intervención;* De forma simple se podría decir que el alcance de los trabajos abarca todos los equipos de Enagás. Sin embargo y para entender un poco a que se llamará equipos, se explica brevemente la arborescencia de Enagás, y su relación con la taxonomía propuesta en la normativa ISO 14224:2016 (38).

En primer lugar, conviene detallar que la estructura propuesta por normativa es referencia en cuanto a modelo, si bien en función de la complejidad de la instalación y de lo que ésta entienda como su “ítem mantenible”, dicha taxonomía puede adaptarse. Así pues, quizás sea más claro y estándar definir que el análisis de criticidad se realizará a nivel de “ítem mantenible”. Esto es importante y tiene sentido si se da un paso atrás y se recuerda que el objetivo fundamental del análisis de criticidad es jerarquizar los activos para adaptar las estrategias de mantenimiento (39). Si ese es el objetivo, se debe realizar el análisis al mismo nivel al que se hace el mantenimiento, lo que cada empresa tenga definido como “ítem mantenible”.

Como ejemplo gráfico, es posible decir que, en un sistema de control distribuido, el ítem mantenible de Enagás es una tarjeta de entradas y salidas digitales. Muy probablemente, la empresa fabricante de dichas tarjetas defina el ítem mantenible a un nivel mucho inferior (hablamos de conectores de la

tarjeta, pistas de cobre, microprocesadores integrados...) porque realmente dicha empresa sí que gestiona esos elementos; sus compras, analiza sus fallos, define las estrategias de cada uno de esos elementos... Sin embargo, Enagás no llega a ese detalle, pues en caso de error de la tarjeta, simplemente la cambia.

Entendido pues lo que se considera “ítem mantenible” y con idea de crear una arborescencia con el suficiente detalle (pero tan simple como se pueda) en Enagás están definidos cinco niveles de intervención o detalle que permiten ir agrupando los activos de manera intuitiva para el usuario. Para ejemplificar esta estructura, se va a utilizar como referencia una planta de regasificación (cada tipo de activo de la compañía tiene su propia estructura). Los niveles de intervención que se encuentran en orden ascendente de detalle serían:

- Planta
- Área
- Instalación
- Sistema
- Ítem mantenible (en adelante equipo)

Esta estructura es la que está replicada en el SGM (Sistema de Gestión de Mantenimiento), que es la aplicación informática basada en SAP que sirve para la gestión de mantenimiento y debe ser aceptada y compartida por toda la empresa. A continuación, se describe brevemente como se define cada nivel de intervención:

*Planta;* Define la planta de regasificación sobre la que se está trabajando

- Barcelona
- Cartagena
- Huelva
- Musel

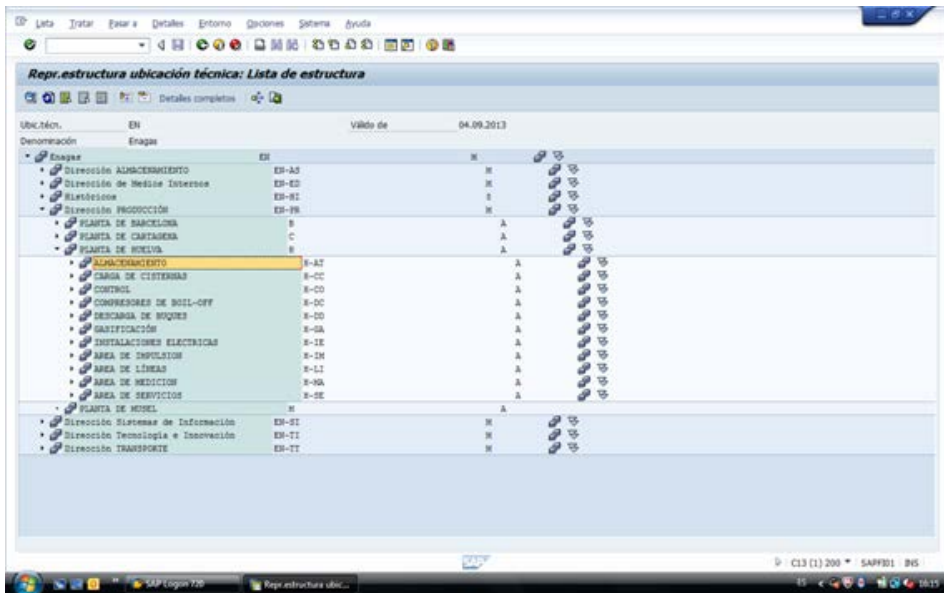


Figura 10; Ejemplo estructura arborescente de las áreas

*Área*; Se trata en la medida de lo posible de acotar lugares físicos dentro de la instalación que permitan identificar rápidamente el lugar del que se habla. También se crean áreas genéricas cuando algún elemento no corresponde a una ubicación física concreta y da servicio a toda la instalación. Puede verse el detalle en la Figura 10.

- Almacenamiento
- Cisternas
- Gasificación
- Control
- Impulsión
- Descarga de Buques
- Compresores Boil-Off
- Instalaciones Eléctricas
- Líneas
- Medición
- Servicios

*Instalación;* Trata de agrupar al conjunto de sistemas que, compartiendo una función genérica común, se pueden identificar de forma unívoca. Como ejemplo, dentro del área de almacenamiento de GNL encontraríamos las instalaciones representadas en la Figura 11:

- Antorchas y venteo
- Tanques de GNL

Denominación	Enagas	EN	N			
• Dirección ALMACENAMIENTO	ES-AS	M				
• Dirección de Medida Inertec	ES-ED	M				
• Relaciones	ES-RE	R				
• Dirección PRODUCCIÓN	ES-PR	M				
• PLANTA DE BARCELONA	B	A				
• PLANTA DE CASTAÑERA	C	A				
• PLANTA DE HUELVA	H	A				
• ALMACENAMIENTO	B-AT	A				
• ANTORCHA Y VENTEO	B-AT-CRYVE	AVP1	I			
• TANQUE FB-101	B-AT-FB101	TALD	I TUML			
• TANQUE FB-111	B-AT-FB111	TALD	I TUML			
• TANQUE FB-121	B-AT-FB121	TALD	I TUML			
• TANQUE FB-131	B-AT-FB131	TALD	I TUML			
• TANQUE FB-141	B-AT-FB141	TALD	I TUML			
• CARGA DE CISTERNAS	B-CC	A				
• CONTROL	B-CD	A				
• COMPRESORES DE SWIL-OFF	B-CC	A				
• DESCARGA DE BOMBAS	B-CD	A				
• GASIFICACIÓN	B-GA	A				
• INSTALACIONES ELECTRICAS	B-IE	A				
• AREA DE IMPULSION	B-IM	A				
• AREA DE LINEAS	B-LI	A				
• AREA DE MEDICION	B-MA	A				
• AREA DE SERVICIOS	B-SE	A				
• PLANTA DE HUELVA	H	A				
• Dirección Sistemas de Información	ES-SI	M				
• Dirección Tecnología e Innovación	ES-TI	M				
• Dirección TRANSPORTE	ES-TT	M				

Figura 11; Ejemplo estructura arborescente de las instalaciones

Como puede observarse, como función global estaría el almacenamiento de GNL, pero dentro existen funciones genéricas que se identifican mediante la instalación. Se recuerda que la forma de agrupar los activos no deja de ser un convenio entre los trabajadores de la organización, y no se puede, con una visión externa, valorar una arborescencia como buena o mala, mientras siga los criterios de definición.

*Sistema;* Agrupa al conjunto de equipos que, si bien cada uno tiene una función específica y concreta, conjuntamente hacen una función genérica dentro de la instalación. No todas las áreas poseen todos los sistemas, ya que no en todos los lugares de la planta se requieren las mismas funciones. De manera



ilustrativa, dentro la instalación de tanque encontraríamos los sistemas representados en la Figura 12:

- Tanque (el contenedor en sí mismo)
- Sistema Calefacción Base Tanque
- Bombas de impulsión
- Válvula Seguridad
- Sistemas Auxiliares
- Sistemas Comunes Instrumentación Asociada A Tanque
- Seguridad Activa/Pasiva

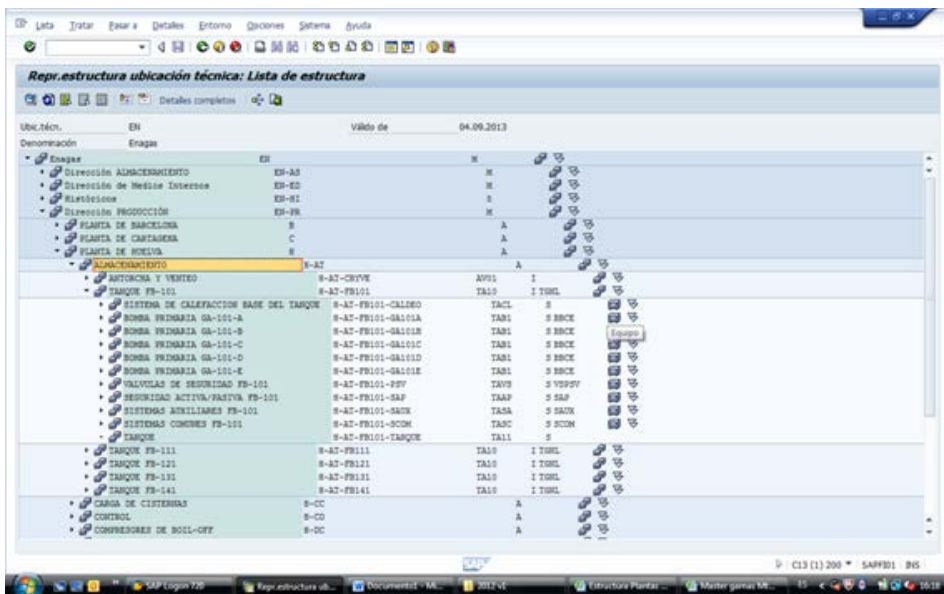


Figura 12; Ejemplo estructura arborescente de los sistemas

*Equipo o Item mantenible*; Es el último detalle al que se llega en la arborescencia en el Sistema de Gestión de Mantenimiento y desagrega el mínimo nivel de intervención y detalle al que se quiere llegar como gestores de la infraestructura. Como ejemplo, dentro del sistema de Bomba, encontraríamos los equipos mostrados en la Figura 13. Este es el nivel al que se realizará el análisis de criticidad.



### 3. Definición de factores de consecuencia;

En primer lugar, se recuerda que la fórmula utilizada para el cálculo de la criticidad en la metodología es la siguiente:

$$CTR = FF * C \quad (1)$$

Siendo la notación utilizada:

- CTR: Criticidad total por riesgo
- FF: Frecuencia de fallos
- C: Consecuencia de los fallos.

Siendo esta la expresión final, se pasa en este punto a definir los factores de consecuencia. Para poder valorar las consecuencias de un fallo funcional, se necesita en primer lugar definir que factores van a ser tenidos en cuenta en dicha evaluación. En este punto es importante tener en cuenta que, si bien el método propone una serie de factores, lo que se presenta en este apartado no dejan de ser los factores que la empresa quiere evaluar y además posteriormente, dándole el peso que se considere a cada uno. Con lo cual en el proceso de definición se fija, no sólo un aspecto meramente técnico del análisis, sino toda una carta de intenciones y un mensaje de la empresa sobre lo que valora y lo que quiere mostrar que valora. Es por eso por lo que se decide, con el fin de dar visibilidad a los valores institucionales de la compañía, dividir los factores en los dos pilares que reflejan la política de gestión de activos de la compañía, y que están representados en la Figura 14:

- *Primer Pilar -> Integridad de los activos;* las estrategias deben estar enfocadas a la seguridad de las personas, seguridad de las infraestructuras y respeto con el medio ambiente
- *Segundo Pilar-> Mejora de la eficiencia en la gestión;* las estrategias deben estar enfocadas a aportar valor a la empresa y a los servicios que ofrece, sin anteponerse jamás al primer pilar.

De una manera casi intuitiva, responde a la propuesta teórica de la metodología, donde académicamente distingue dos tipos de factores; los relacionados con la seguridad, y los relacionados con el coste. Queda así claro que la distinción es similar, si bien será a la hora de ponderar donde se dará o no es importancia relativa al primer pilar frente al segundo, es decir, a los factores relacionados con la seguridad frente los relacionados con el coste.

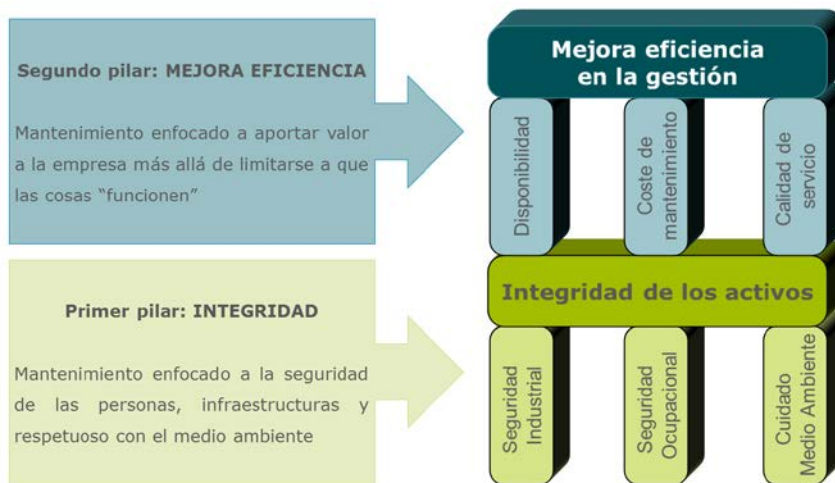


Figura 14; Resumen política gestión mantenimiento Enagás

Una vez hecha esta primera división de pilares, se pasa a describir cada uno de los factores propuestos para el análisis de consecuencia. Dentro del pilar de integridad, los factores de consecuencia relacionados con la seguridad definidos son:

- *Factor de SEGURIDAD INDUSTRIAL y SEGURIDAD OCUPACIONAL*; El factor analiza las consecuencias derivadas de la pérdida funcional de un ítem mantenible en el posible daño al personal de la instalación, y/o a cualquier otra persona que pudiera encontrarse en el entorno de ésta. Además, debe tener en cuenta el daño causado a los propios activos industriales, así como productos o materiales utilizados en el proceso productivo, o en el producto final.
- *Factor de MEDIOAMBIENTE*; El factor analiza las consecuencias derivadas de la pérdida funcional de un ítem mantenible en el

medioambiente, teniendo en cuenta además los posibles costes derivados de la recuperación de éste, así como hipotéticas sanciones o indemnizaciones.

Dentro del pilar de mejora de la eficiencia, los factores de consecuencia relacionados con el coste son:

- *Factor de CALIDAD DE SERVICIO*<sup>2</sup>; Este factor analiza las consecuencias derivadas de la pérdida funcional de un ítem mantenible en las condiciones en las que la instalación presta sus servicios a sus clientes, teniendo en cuenta todos los aspectos relacionados (normativas, plazo, calidad...)
- *Factor de DISPONIBILIDAD*; Este factor analiza las consecuencias derivadas de la pérdida funcional de un ítem mantenible en la capacidad de la instalación para operar en sus valores nominales definidos en proyecto.
- *Factor de COSTE DE MANTENIMIENTO*; Este factor analiza las consecuencias derivadas de la pérdida funcional de un ítem mantenible en los costes asociados a la intervención correctiva requerida para la restauración de la función del equipo. Deben incluirse tanto los costes del equipo, como todos los que puedan derivar.

Como puede verse, la definición que se ha hecho de los factores de consecuencia, es una adaptación de los criterios que propone el método en base a la estrategia de la compañía. Es cierto que el método da absoluta libertad para los factores que cada empresa considere, pero como en alguna ocasión se ha comentado, este análisis de criticidad y de riesgos, no sólo tiene implicaciones para la optimización del mantenimiento sino que cada vez más normativas y certificaciones exigen que se tenga procedimentada la gestión del riesgo (7,18), y por tanto tiene sentido

---

<sup>2</sup> En la calidad del servicio se considera el cumplimiento con las especificaciones del suministro del servicio (condiciones de entrega o recepción del gas, su temperatura, presión, odorización, medida, punto de rocío, etc.), así como la continuidad de dicho suministro.

ajustarse en la medida de las posibilidades al estándar o recomendación de los expertos a fin de dar credibilidad y consistencia al análisis realizado.

#### 4. *Ponderación de los factores de consecuencia*

La ponderación de los factores, es la fase del proyecto que va a permitir “objetivar lo subjetivo”. Al asignar pesos a cada factor, se le está dando una importancia objetiva (o al menos de consenso entre expertos) a lo que posteriormente será una valoración de consecuencia de un fallo. Cuando se trata de ponderar una opinión o una visión, siempre es bueno tener algún criterio que te permita dar soporte a dicho valor. Posteriormente se verá que, en el caso de los niveles de severidad, existen conceptos que lo facilitan como posibles indemnizaciones, pérdidas productivas, costes históricos... Sin embargo, en la ponderación de los factores, se presenta una visión más estratégica, y tiene más que ver con las bases sobre las que quiere desarrollarse el modelo global de gestión del riesgo.

La metodología propone algunas guías para facilitar la ponderación, que son:

- Los pesos deben estar acordes a la importancia relativa del impacto en los objetivos estratégicos. No tiene sentido tratar de definir o ponderar criterios diferentes a los marcados en las políticas corporativas, pues si bien podrían llegar a responder a objetivos particulares del área de mantenimiento, nunca permitirían una alineación entre los objetivos de esta área y los de la compañía.
- Se debe definir una escala normalizada y de común aceptación que permita identificar de manera natural la importancia de la consecuencia. Dentro de este proceso de cuantificación, se ha tomado la escala natural de 1 a 100 que permite tener suficiente sensibilidad dentro de las consecuencias, sin llegar a un detalle extremo. No deja de ser un convenio utilizado para un posterior análisis de resultados, de manera matemática y gráfica. Así pues, cada factor debe tomar un valor entre 0 y 100, debiendo ser la suma total de todos los factores igual a 100.
- Se debe introducir el concepto de inadmisibilidad. Este concepto refiere, que pueden existir pérdidas funcionales de consecuencias inadmisibles para un determinado factor. En estos supuestos, al valor global de consecuencia se le asigna automáticamente la máxima puntuación (100) caracterizando directamente la pérdida funcional del elemento como de máxima severidad. Esto permite que esta máxima valoración sea

independiente de las consecuencias de otros factores, y de la ponderación elegida para los mismos. Se podrá ver más claramente en el desarrollo del ejemplo, pero se adelanta que a los factores a los que se les ha asignado automáticamente un valor de 100 en caso de que exista una máxima severidad en la consecuencia del análisis de ese factor, son a los dos pertenecientes al pilar de integridad: Seguridad Industrial y Medio Ambiente.

A pesar de cumplir estas consideraciones, asignar estos pesos a los criterios, no esta exento de un valor subjetivo de juicio de los expertos que los definan. En caso de querer que esta valoración sea lo más consistente posible, existen técnicas como el proceso de jerarquía analítica AHP (Analytical Hierarchy Process). Se puede utilizar un modelo de clasificación multicriterio en un diagrama de decisión lógica que permita solucionar los criterios de decisión de los nodos (el lector puede tomar como referencia a Bevilacqua et al. (40) para ver como utilizar la técnica AHP con este objetivo). Una ventaja de este tipo de técnicas es que incluyen en el esquema de clasificación los criterios cualitativos y cuantitativos, lo que sin duda aporta valor a la metodología (41).

La ponderación que se muestra en la Tabla 2 es el resultado del consenso del equipo de trabajo como base para el modelo de gestión del riesgo. Como no se deja de remarcar durante todo el proceso, es parte de la simplicidad y complejidad del proceso, pues no existe ponderación mejor o peor cuando se habla del valor exacto de la misma, sino de que se entienda como se toma la decisión, y sea compartida por toda la organización.

Factores del pilar de integridad		Factores del pilar de eficiencia		
Seguridad Industrial	Medioambiente	Calidad de Servicio	Disponibilidad	Coste de Mantenimiento
35%	15%	25%	20%	5%
<b>50%</b>		<b>50%</b>		

Tabla 2; Ponderación factores de consecuencia

El razonamiento que tuvo como resultado esta ponderación se basaba en una serie de premisas del equipo de trabajo:

- Que existiera equilibrio global entre todas las ponderaciones, con una diferencia razonable de numeración en función de la importancia relativa para la organización; es por esa razón que no existen grandes diferencias entre los pesos de los diferentes factores, pero se marca claramente un orden.
- Que ambos pilares tuvieran un peso comparable, ya que como metodología de gestión del riesgo no se basa en mirar estrictamente aspectos de seguridad, sino también de las implicaciones de éstas en la eficiencia. Es por eso por lo que ambos pilares tienen el mismo peso global.
- Que el pilar de integridad, aun siendo comparable con el de eficiencia de manera global, tuviera criterios de inadmisibilidad, lo que sin duda destaca la importancia relativa de la seguridad frente a la eficiencia en casos concretos. Esto no se refleja en la puntuación, pero se apreciará en la definición de los niveles de severidad.

Con las premisas previamente descritas, se definió la ponderación de los factores de consecuencia que se expone a continuación.

##### *5. Definición y ponderación de los niveles de severidad*

Si bien para los factores de consecuencia se ha separado en dos pasos la definición y la ponderación, con el objetivo de hacerlo más ilustrativo, en los niveles de severidad y factor de frecuencia de fallo se integrarán dentro del mismo epígrafe.

Una vez decidido cuál va a ser el peso y por tanto la importancia de cada uno de los criterios a la hora de valorar la consecuencia de un fallo funcional, existe la necesidad de escalar y ponderar cada uno de esos factores, de manera que se pueda cuantificar la gravedad del fallo en sí. Se revisará cada uno de los factores implicados en el análisis de la criticidad detallando esos niveles de consecuencia y el peso que se dará a cada uno.

También es importante aclarar que, como se ha descrito previamente, existen consecuencias derivadas de la pérdida funcional de un elemento que se pueden considerar inadmisibles. Para su valoración, se le asigna el máximo valor (100) para ese factor y por lo tanto para todo el elemento en su conjunto. Cuando se cumple este caso, la valoración máxima se fija independientemente del peso asignado al



al resto de factores y consecuencias analizados para dicho fallo funcional.

Las consideraciones tenidas en cuenta para la definición de consecuencias inadmisibles deben estar claramente consensuadas dentro del grupo de trabajo, y recogidas en la documentación de análisis.

A continuación, se definen los saltos que existirán en los valores intermedios de un factor, que son las escalas. Los valores que se les asignarán a los distintos niveles de consecuencias, deben estar relacionados con el impacto relativo que cada nivel de consecuencia tiene en el negocio. Al valor máximo de severidad dentro de la escala de un factor, se le otorgará el valor que previamente se haya asignado en la ponderación de ese factor. De esta manera, el valor máximo de la severidad de un elemento, será la suma de las consecuencias máximas para cada uno de los criterios seleccionados, y por tanto será 100.

El siguiente paso es definir los niveles de gravedad de cada criterio de consecuencia. Estos niveles medirán la gravedad de las consecuencias de un fallo y nos ayudarán a ponderarlo. El primer paso es evaluar cuántos niveles diferentes deben definirse para cada criterio. Si bien es una decisión abierta, en el caso de Enagás se decidió que cuatro niveles era un número óptimo para desarrollar un análisis preciso y masivo, además de ajustarse a algunos de los estándares propuestos en la metodología (36).

Para cada criterio hay que redactar cada nivel de posibles consecuencias que implica una pérdida funcional. Cada definición debe ser lo más sencilla y explícita posible. Si se define de esta manera, se limita la subjetividad del análisis y por tanto se simplifica enormemente el proceso de valoración. Para realizar esta definición, es necesario conocer el efecto o consecuencia promedio (42) en cada uno de los factores considerados para el análisis, de manera que se pueda justificar el factor de escala que se dara a cada incidencia en el algoritmo (43).

El proceso de análisis será entonces fijar los valores que ponderan el factor, definir la clasificación de cada grupo y fijar el valor propuesto de la escala. Se detallan en este punto los niveles de severidad definidos para cada factor, así como los conceptos recogidos en cada nivel y la ponderación propuesta para cada uno de ellos.

*Factor de Seguridad Industrial y Seguridad Ocupacional (Tabla 3)*

- *Catastrófico (CA)*: Efecto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable o con víctimas mortales o incapacidad permanente. (Este análisis daría una valoración de “inadmisibilidad” del fallo y por tanto daría la máxima puntuación (100) de severidad al equipo independientemente del resto de factores)
- *Crítico (CR)*: Impacto alto con necesidad de sofocar el incidente con medios exteriores; o daños en zona exterior no vulnerable; o lesión grave que deriva en una incapacidad temporal prolongada
- *Moderado (MO)*: Impacto alto con capacidad de sofocar el incidente con medios propios; o lesión menor y reversible a trabajadores
- *Leve (LE)*: Impacto leve con capacidad de sofocar el incidente con medios propios; o lesión leve sin afección al desarrollo del trabajo. Se incluye que pueda no haber impacto.

Clasificación	Escala
Catastrófico	100
Crítico	35
Moderado	20
Leve o no impacto	0

Tabla 3; Ponderación de factor de seguridad industrial

*Factor de Medioambiente (Tabla 4)*

- *Alto (A)*: Efecto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable (Este análisis daría una valoración de “inadmisibilidad” del fallo y por tanto daría la máxima puntuación (100) de severidad al equipo independientemente del resto de factores)
- *Medio (M)*: Impacto alto con necesidad de mitigar el incidente con medios exteriores; o daños en zona exterior no vulnerable

- *Bajo (B)*: Impacto medio o bajo con capacidad de mitigar el incidente con medios propios
- *No Impacto (NI)*: No impacto

Clasificación	Escala
Alta	100
Media	15
Baja	5
No impacta	0

Tabla 4; Ponderación de factor de medioambiente

*Factor de Calidad de Servicio (Tabla 5)*

- *Alto (A)*: Impacto elevado en imagen de empresa o ausencia de servicio de manera inmediata.
- *Medio (M)*: Impacto medio en imagen y/o económico alto por reclamaciones contractuales de más de 30.000 €
- *Bajo (B)*: Impacto bajo en imagen y/o económico por reclamaciones contractuales de menos de 30.000 €
- *No Impacto (NI)*: No impacto

Clasificación	Escala
Alta	25
Media	15
Baja	5
No impacta	0

Tabla 5; Ponderación de factor de Calidad de Servicio

*Factor de Disponibilidad (Tabla 6)*

- *Muy Alto (MA)*: Parada de instalación. Pérdida total de la función o funciones principales por un tiempo > 2hrs.
- *Alto (A)*: Disminución capacidad productiva superior al 50% durante más de 12 horas o la pérdida de redundancia de 15 días o más.
- *Medio (M)*: Disminución capacidad productiva inferior al 50% o incrementos de costes operacionales más de 30.000 € o pérdida de redundancia menor de 15 días
- *Bajo (B)*: Bajo. No genera efecto significativo o con costes operacionales menores de 30.000 €

Clasificación	Escala
Muy Alta	20
Alta	10
Media	5
Baja	0

Tabla 6; Ponderación de factor de Calidad de Servicio

*Factor de Costes de mantenimiento (Tabla 7)*

- *Muy Alto (MA)*:  $C > 30.000 \text{ €}$
- *Alto (A)*: Mayor o igual a  $5.000 < C < 30.000 \text{ €}$
- *Medio (M)*: Costes  $600 < C < 5.000 \text{ €}$
- *Bajo (B)*: Menos de 600 €

Clasificación	Escala
Muy Alta	5
Alta	4
Media	3
Baja	1

Tabla 7; Ponderación de factor de Coste de Mantenimiento

Una vez definidos todos los niveles de severidad para cada uno de los factores, y su posterior ponderación, se pueden resumir de manera simplificada como se muestra en la Tabla 8. Ésta tabla será la base que permitirá categorizar el nivel de severidad de cada uno de los ítems analizados en función de las consecuencias derivadas de un hipotético fallo funcional.

	Seguridad Industrial (35%)	Medio Ambiente (15%)	Calidad de Servicio (25%)	Disponibilidad (20%)	Costes de Mantenimiento (5%)				
Catastrófico	100	Alta	100	Alta	25	Muy Alta	20	Muy Alta	5
Crítico	35	Media	15	Media	15	Alta	10	Alta	4
Moderado	20	Baja	5	Baja	5	Media	5	Media	3
Leve	0	No impacta	0	No impacta	0	Baja	0	Baja	1

Tabla 8; Resumen factores de consecuencia y niveles de severidad

Si bien la tabla resumen permite visualizar de manera muy sencilla y simplificada los valores utilizados para la formulación, para la realización efectiva del análisis se utiliza lo que se denomina matriz de análisis, donde más que los valores, se reflejan las definiciones que nos servirán de base para el mismo. Durante las sesiones de trabajo, no es tan importante la ponderación, como las diferentes casuísticas contenidas en las definiciones, y que por tanto permiten valorar cualitativamente el impacto de un fallo funcional.

### 6. Definición y ponderación del factor frecuencia de fallo

El factor de frecuencia de fallo tiene una definición y ponderación diferente a la realizada para los factores de consecuencia. En este caso no se trata de objetivar y ponderar definiciones o conceptos, sino asignar un valor, a un número objetivo. Mientras que los factores se referían a conceptos, la frecuencia de fallo es un valor objetivo y medible. Sin embargo, la metodología asigna una ponderación a los niveles definidos de manera que se pueda realizar el cálculo de la criticidad de manera más simple sin utilizar directamente el valor de frecuencia de fallo. Dicho factor se considera como el número de pérdidas funcionales del elemento durante el tiempo analizado, haciendo posteriormente el promedio anual de las mismas. Dado que el análisis de criticidad se realizará activo a activo, este factor también se considerará a nivel individual. Al ser un valor medible, sería tremendamente útil para la realización de la matriz, poder contar en la base de datos del GMAO corporativo con dichos valores. En caso de que no pueda obtenerse del sistema automáticamente, será necesario hacer la mejor estimación que puedan realizar los especialistas durante el análisis.

Siguiendo el esquema de niveles análogo a los factores, se van a definir cuatro niveles que nos permitan obtener la sensibilidad deseada. A cada nivel habrá que asignarle un rango de frecuencias de fallo, y a su vez, un valor de escala, que será el que se multiplique por la consecuencia para obtener la criticidad.

---

Fallos anuales	Clasificación	Escala
$4 < f$	Muy Alta	2
$2 < f < 4$	Alta	1,6
$1 < f < 2$	Media	1,2
$f < 1$	Baja	1

---

Tabla 9; Ponderación de factor de frecuencia de fallo

Al igual que en pasos previos, existen mecanismos para determinar el nivel de ponderación en función de la tasa de fallos promedio para cada ítem mantenible, de manera que se puede justificar el valor de escala que se asigna en la metodología a cada nivel frecuencia de fallo. Los niveles, su cuantificación y la escala propuesta se muestran en la Tabla 9.

Con todos los factores y niveles, definidos y ponderados, se puede ya obtener el nivel de criticidad de cada ítem mantenible. Para ello, se deben tomar los valores analizados de cada uno de los factores que intervienen en el cálculo de la criticidad: la frecuencia de fallo, y las consecuencias de éstos (medido con las unidades adimensionales de criticidad definidas previamente entre 0-100). Mediante la obtención de estos valores, se puede situar a cada equipo en una de las celdas de la matriz de criticidad. En el proyecto se ha definido una matriz de dimensiones 4x10 (filas por columnas). Se situará en el eje vertical el valor de frecuencia de fallos en el eje horizontal el valor de consecuencias obtenido de sumar los valores de cada criterio en la escala seleccionada. Para poder tener una visión completa de una infraestructura, se situará en el interior de cada celda el número de equipos que una vez analizados coincidan en consecuencia y frecuencia de fallo., se indica en el interior de la celda. La matriz de criticidad utilizada por Enagás jerarquiza los activos en tres zonas diferenciadas:

- Zona de activos No Críticos (Verde)
- Zona de activos de Media Criticidad (Amarillo)
- Zona de activos Críticos (Rojo)

Los límites definidos en el proyecto, y que fijarán las políticas aplicadas a cada uno de los activos en función de su situación en la matriz, son los siguientes:

- Límite baja-media criticidad: 50 uds. Adimensionales de criticidad
- Límite media-alta criticidad: 90 uds. Adimensionales de criticidad

De acuerdo a esta definición, se considera que un elemento de severidad alta con una valoración superior a 90 uds, va a ser crítico sea cual sea su frecuencia de fallo. Sin embargo, activos con un nivel de severidad medio, entre 50-60uds, podría ser crítico o semicrítico en función de la frecuencia de fallo. El ejemplo es extrapolable a todos aquellos equipos que se situen cerca de los límites de las zonas definidas.

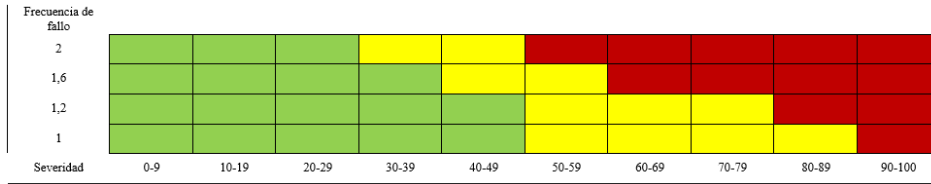


Figura 15; Matriz de criticidad

Cabe destacar que se es consciente de que el esquema gráfico propuesto y mostrado en la Figura 15 de la matriz de la criticidad no responde exactamente al análisis matemático, pues la matriz es un elemento de representación discreta, mientras que la formulación representa un sistema continuo. Sin embargo, de cara al análisis y entendimiento de la gestión del riesgo por parte de los especialistas es más sencillo un sistema de escalones y de celdas, que una línea curva que delimitara los umbrales. De ahí que a partir de ahora se vaya a realizar el análisis de acuerdo con la matriz y a como los elementos quedan representados en ella.

### 3.1.1.3. Ejemplo práctico de aplicación a un activo de gas natural; metodología

Todos los pasos previos descritos han sido los necesarios para la adaptación de la metodología de análisis de criticidad al sector del gas natural, y en concreto los adoptados por la compañía. De una manera coloquial podríamos decir que son las reglas del juego. Son los acuerdos previos tomados por todas las partes involucradas en el análisis, para que durante la ejecución de la metodología se limiten al máximo las posibles diferencias de opiniones. Cuanto mayor sea el detalle y consenso acordado hasta este momento, mejor será el desarrollo del proyecto. Sin embargo, el procedimiento sigue moviéndose en el marco teórico, y va a ser a partir de este momento cuando comienza a ser una realidad. La fase que a continuación se pasa a describir es la de la ejecución en sí. Para ello, se han de seguir una serie de pasos secuenciales que pasan a describirse.

Los pasos 1 y 2 se realizan una sola vez para cada instalación o sistema que se vayan a analizar siendo común para todos los elementos que lo componen:

1. *Definición de la instalación y su funcionalidad:* el objetivo es obtener una visión completa de la instalación en la que funciona el elemento analizado. Por lo tanto, algunos criterios de análisis están relacionados con toda la instalación. Por ejemplo, la disponibilidad o la calidad del servicio no se



analizan para cada elemento, sino para toda la instalación. Es muy importante tener la instalación bien definida para hacer una correcta evaluación de la criticidad.

2. *Definición de la función del sistema:* Centrándonos en el sistema (de acuerdo con la taxonomía descrita para Enagás) donde se encuentra el activo, se debe analizar la función concreta del sistema dentro de la instalación (sistema de emergencia, sistema de control...). Es importante conocer la importancia real del sistema para el correcto funcionamiento de la instalación y por tanto sus implicaciones en caso de fallo.

Los pasos que alcanzan del 3 al 8 se realizan específicamente para cada activo a analizar y por tanto se realizaron de manera secuencia para cada uno de los equipos que conforman el posterior ejemplo:

3. *Definición de la función del elemento (activo analizado) y su contexto operativo:* El objetivo final para desarrollar el análisis de criticidad es analizar la consecuencia de una pérdida funcional. Por eso hay que definir la función concreta de cada elemento: bombear, cerrar, comprimir...
4. *Definición de la pérdida funcional:* Después de tener definida la función de cada elemento, es fácil extrapolar una posible pérdida funcional. El punto clave en este paso es diferenciar un fallo de una pérdida funcional. Cada ítem tiene múltiples fallos posibles, pero sólo una única pérdida funcional para cada función del ítem. Si consideramos que la función de un elemento es "bombear", su pérdida funcional será la "ausencia de bombeo". Puede parecer una obviedad, pero depende de para quien, a veces no bombear dentro de unos límites puede ser un fallo, pero si no está definido con un rango concreto e incluido dentro del contexto operacional, será difícil que pueda incluirse en el análisis.
5. *Análisis de las consecuencias del fallo:* En este paso se evaluarán las consecuencias de una hipotética pérdida funcional. Utilizando la Tabla 8 definida en el capítulo anterior, se deben seleccionar las consecuencias de un hipotético fallo en cada criterio de consecuencia.
6. *Determinación de la severidad de una pérdida funcional:* Cada criterio consecuencia tiene un valor numérico que refleja la importancia de las consecuencias para la empresa. En este paso, se recogen estos valores numéricos para obtener un valor de gravedad final.

7. *Determinación de la frecuencia de los fallos:* En función de la definición realizada en el apartado anterior, se debe calcular la frecuencia de fallo de cada elemento para obtener el segundo parámetro necesario para la estimación de la severidad.
8. *Cálculo del nivel de criticidad:* Podemos obtener el nivel de criticidad multiplicando la frecuencia de fallos por el nivel de severidad, ambos calculados en los pasos anteriores.

#### 3.1.1.4. Ejemplo práctico de aplicación a un activo de gas natural; aplicación

A continuación, se describe un ejemplo sencillo de aplicación de la metodología. Se van a describir uno a uno los diferentes pasos descritos en la sección previa, y en cada uno se irán destacando los aspectos clave del análisis. Es importante destacar que para darle el carácter más divulgativo posible se han tomado determinadas asunciones y se ha simplificado al máximo los elementos que intervienen en la instalación sobre la que se desarrolla el ejemplo. El objetivo es entender cómo se piensa y decide durante el análisis, y se pretende por tanto que esta aplicación sea lo más comprensible posible.

##### Análisis de los aspectos comunes a todos los activos de la instalación

Como se ha explicado previamente, los pasos 1 y 2 son comunes a todos los activos que conforman el ejemplo que se pretende ilustrar.

##### *Paso 1; Definición de la instalación y su funcionalidad.*

La instalación analizada en este ejemplo práctico es el nudo de válvulas que determina el flujo de gas natural previo a una ERM (Estación de Medición y Regulación)

En el Sistema Gasista Español, el transporte del gas natural se realiza a través de lo que se denomina la Red Troncal de Gasoductos. Es donde se dan los grandes flujos de movimiento de gas, y dicho flujo se realiza a alta presión (72 bares). Para que dicho gas sea suministrado al consumidor final, el GN (Gas Natural) pasa de la Red Troncal, a la red de distribución, que ya no es propiedad de Enagás. En dicha red, la presión del gas debe ser la misma a la que llega a los hogares, 16 bares. La bajada de presión de 72 bares (transporte) a 16 bares (distribución) se realiza en las ERM. El análisis se va a centrar en este nudo de válvulas, ya que son los elementos más

simples y con un entorno operacional más fácil de analizar y comprender.

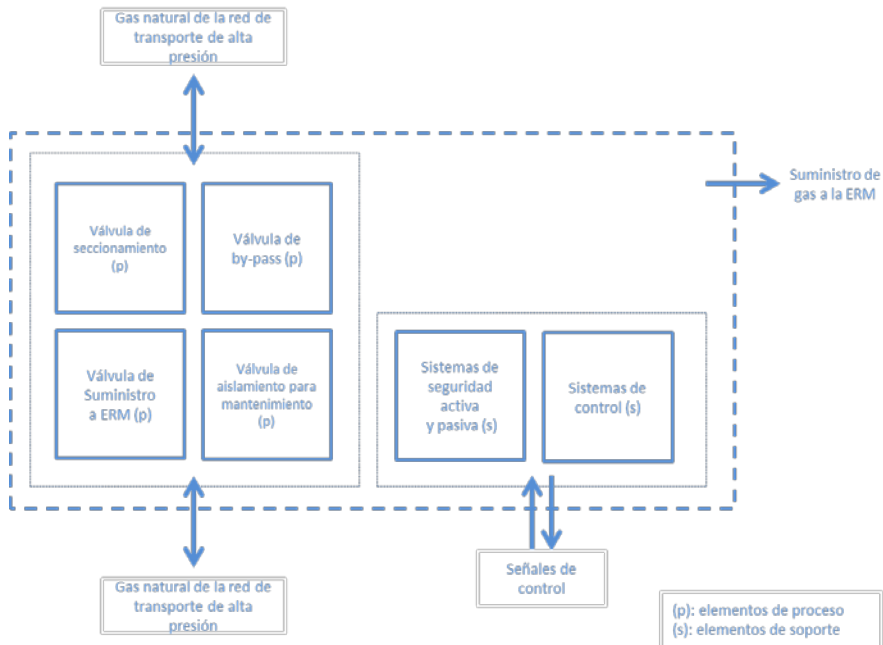


Figura 16; Esquema EPS de un nudo de válvulas

La función del nudo de válvulas es:

- Seccionamiento del gasoducto de transporte de alta presión en caso de fuga o intervención en el mismo.
- Suministro de gas desde la red de transporte de alta presión (72 bares) a la estación de regulación y medida donde se conecta la red de distribución a baja presión (16 bares).
- Aislamiento y by-pass para intervenciones especiales

De un modo funcional, podemos analizar el sistema con el esquema EPS mostrado en la Figura 16.

Los equipos relacionados con el proceso, y sobre los que se va a centrar el análisis

son todos válvulas. Existen otras funciones en la instalación llevadas a cabo por otros elementos de soporte relacionados con control o seguridad, pero se van a omitir del análisis con el objetivo de simplificar el ejemplo.

Una vez definida la instalación con un esquema funcional, en la figura 17 se pasa a describir de un modo más visual. En ella se muestran los 9 equipos que integran el nudo de válvulas (a, b, c..., i) que cumplen las funciones de proceso de la instalación y en las que se va a centrar el análisis.

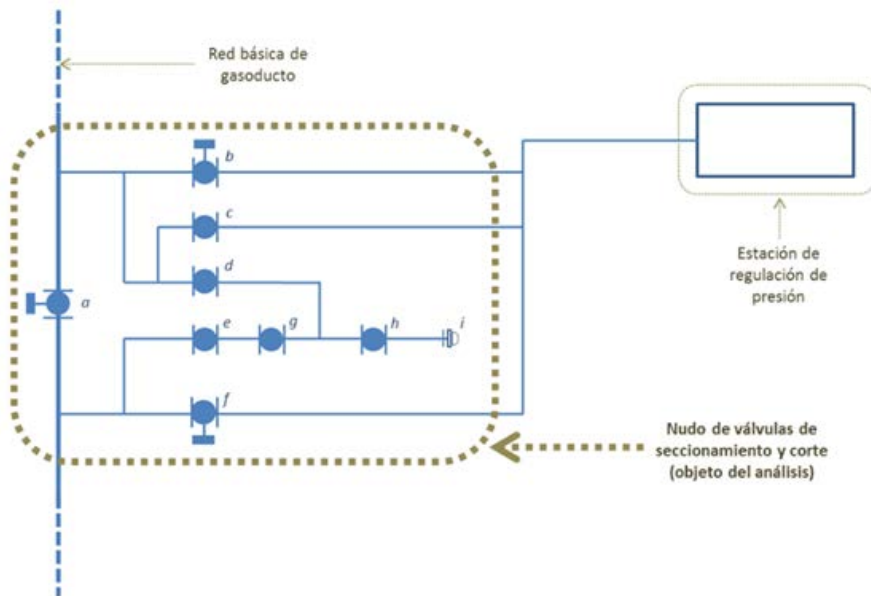


Figura 17; Esquema gráfico de un nudo de válvulas

De un modo más visual, en la figura 18 se muestra el funcionamiento habitual de la instalación y, por tanto, esa doble función comentada anteriormente. Desde un punto de vista de servicio y por tanto de función orientada al cliente, tiene la función de suministrar gas a la estación de regulación y medida desde la red básica de gasoducto. Por otro lado, tiene la función de seccionar los tramos de gasoducto y cortar el suministro de gas en caso de incidencias. En operación habitual, ha de mantener libre el paso de gas a través del gasoducto.

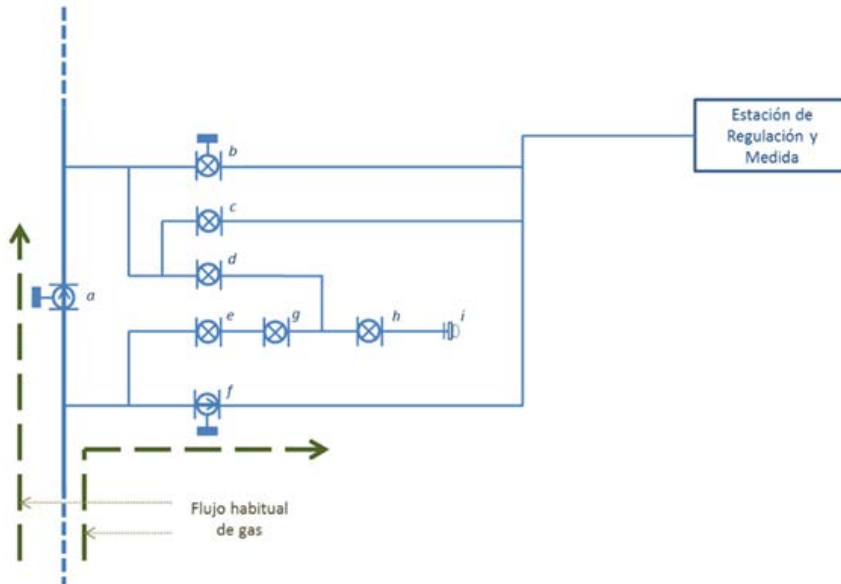


Figura 18; Esquema funcionamiento habitual de la instalación

### *Paso 2; Definición de la función del sistema*

Para comenzar a familiarizarnos con estos equipos, se ha diferenciado según su función. De esta manera se puede observar de un modo más sencillo la función específica que se relaciona con cada una de las válvulas:

- Válvulas de seccionamiento -> equipo a
- Válvulas de suministro a ERM -> equipos b y f
- Válvulas de by-pass -> equipos e, g y d
- Válvulas de aislamiento para mantenimiento -> equipos c y h.

Estos dos primeros pasos de la metodología se realizan de manera genérica para el global de la instalación a analizar. El objetivo es centrar las funciones que vamos a trabajar en su contexto operacional, para encauzar el análisis posterior que se realizará equipo a equipo.

Los siguientes pasos serían para cada uno de los elementos mantenibles a analizar. Como es un ejemplo ilustrativo, se va a realizar para todas y cada una de las válvulas que componen el sistema. Si bien en algún momento las descripciones pueden ser ciertamente repetitivas, se entiende que merece la pena por descubrir algunos de los matices del análisis.

### Análisis de la válvula “a”

*Paso 3; Definición de la función del elemento (activo analizado) y su contexto operativo*

El equipo que se analiza es una válvula motorizada. En su operación habitual, está válvula está abierta para permitir el flujo libre de gas a través de la red básica de gasoducto como ya se había mostrado en la Figura 18. Así pues, el equipo tendría una doble función: permitir el paso de gas en la red de transporte de alta presión en operación habitual, y el corte de flujo de gas ante una posible eventualidad en el gasoducto. De esta forma se puede seccionar en tramos la tubería y limitar los daños derivados de la posible incidencia como se muestra en la Figura 19.

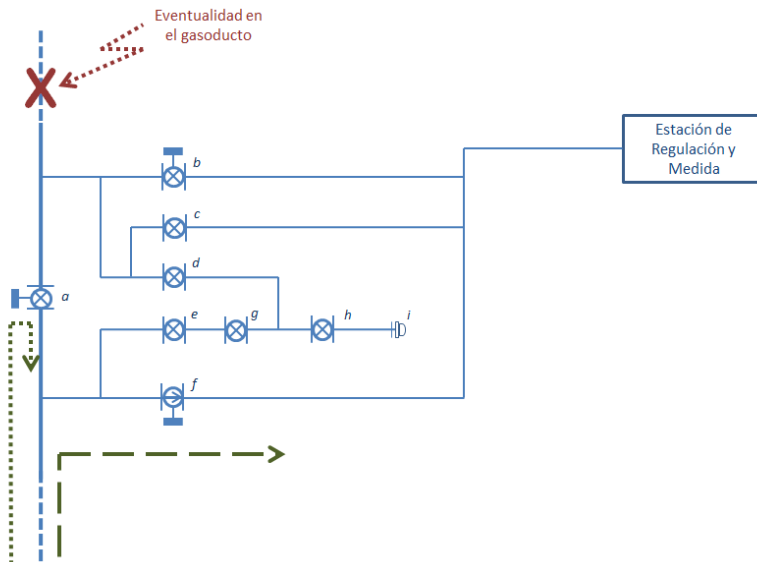


Figura 19; Evento supuesto para analizar consecuencia

*Paso 4; Definición de la pérdida funcional*

Cuando se habla de definir los fallos funcionales de un elemento, es bueno especificar que no estamos valorando los posibles modos de fallo (rotura, desgaste, desalineamiento...), sino que pérdida de función vamos a valorar. Un elemento puede tener su función primaria (dar servicio o corte de suministro en el ejemplo de la válvula), pero también tiene funciones secundarias como seguridad o eficiencia que podemos querer valorar. Cuanto más se simplifiquen las funciones a analizar, más sencillos serán los análisis. Así pues y como regla general, hemos valorado sólo la función principal, en este caso el cierre y la apertura de la válvula. Por lo tanto, los fallos funcionales a analizar serán, fallo al abrir, o fallo al cerrar.

*Paso 5; Definición de la pérdida funcional*

A la hora de realizar el análisis de las consecuencias es importante hacernos las preguntas oportunas para que la valoración refleje realmente la posible consecuencia de un fallo funcional. Por tanto, la pregunta a realizar para el análisis es: "¿Qué consecuencia tendríamos ante un fallo de la válvula "a", en caso de que fuera necesario utilizarla?". Para dar lógica al análisis debemos suponer la situación más significativa en la que fuera necesario operar dicho elemento. Para el análisis de esta válvula vamos a suponer una fuga en el gasoducto (por ejemplo, derivada de un incidente con terceros) que requiriera de un cierre de la misma.

Es importante matizar que se debe evaluar el fallo de un equipo en el momento en el que su funcionamiento es requerido, y por tanto cuando su fallo provoca una consecuencia negativa para nuestra instalación. Por ejemplo, no tendría sentido analizar el fallo de un detector de gas cuando no hay presencia de gas, pues nunca tendría consecuencias. La pregunta en el ejemplo propuesto sería "¿qué consecuencias tiene la pérdida de un detector de gas, cuando se produce una fuga?".

También es interesante matizar, que en este tipo de análisis de criticidad no se evalúan los fallos concatenados. Esto significa que, para valorar la consecuencia del fallo de un equipo, debemos suponer exclusivamente el fallo de ese equipo y no los de los equipos que le rodean o dan soporte a dicho equipo.

Atendiendo a las premisas descritas, lo que debemos analizar son las posibles consecuencias en cada uno de los factores descritos en la metodología para el supuesto descrito: una fuga en el gasoducto que requiere del cese de flujo de gas a

través de la red básica de gasoducto cerrando la válvula “a” (fallo al cerrar) o una imposibilidad de apertura de ésta en operación normal (fallo al abrir).

Si bien se definen estas dos funciones, al existir la premisa de que la instalación está en una red mallada de gasoducto (tiene suministro de gas en ambos lados de la red), la imposibilidad de apertura no tendría consecuencias más relevantes que la imposibilidad de cierre. Como se van a recoger las valoraciones más críticas de cada uno de los fallos funcionales, en este caso analizaremos sólo el fallo al cierre.

*Valoración del criterio de seguridad industrial;* El objetivo de seccionar y cortar el tramo de gasoducto afectado es limitar el suministro de gas y así minimizar los riesgos asociados a una fuga. Por tanto, y en el supuesto de no poder cerrar la válvula, se generaría un riesgo muy alto, ya que provocaría un riesgo de explosión en la zona de la fuga y por tanto con un riesgo de víctimas mortales. Según esta descripción, y analizando los niveles de severidad definidos, las consecuencias en el criterio de seguridad industrial se catalogarían como “catastrófico” de acuerdo con lo descrito en la Tabla 10.

Criterio de Seguridad Industrial	Niveles
<i>Efecto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable o con víctimas mortales o incapacidad permanente</i>	<i>Catastrófico</i>
Impacto alto con necesidad de sofocar el incidente con medios exteriores; o daños en zona exterior no vulnerable; o lesión grave que deriva en una incapacidad temporal prolongada	Crítico
Impacto alto con capacidad de sofocar el incidente con medios propios; o lesión menor y reversible a trabajadores	Moderado
Impacto leve con capacidad de sofocar el incidente con medios propios; o lesión leve sin afección al desarrollo del trabajo. Se incluye que pueda no haber impacto.	Leve

Tabla 10; Valoración criterio Seguridad Industrial



*Valoración del criterio de Medioambiente;* en este criterio, la consecuencia tendría relación con la emisión de gas metano a la atmosfera proveniente del fallo que estamos suponiendo. Con el mismo razonamiento que en el criterio anterior, la valoración deriva de que al fallar la válvula “a” no podría cortar el suministro de gas ante la eventualidad en el gasoducto. Esto implicaría una mayor emisión de gas metano que si se hubiera cerrado la válvula “a”. Por tanto, la valoración de acuerdo con los niveles de severidad acordados se correspondería con la definición de “Bajo”, pues se tendría un impacto medio en la instalación, pero mitigado con medios propios (cerrando la válvula de otra posición cercana) de acuerdo a lo descrito en la Tabla 11.

Criterio de Medioambiente	Niveles
Impacto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable	Alto
Impacto alto con necesidad de mitigar el incidente con medios exteriores; o daños en zona exterior no vulnerable	Medio
<i>Impacto medio o bajo con capacidad de mitigar el incidente con medios propios</i>	<i>Bajo</i>
No impacto	No Impacto

Tabla 11; Valoración criterio Medioambiente

*Valoración del criterio de calidad de servicio;* en este caso se debe evaluar si ante un fallo de la válvula “a” se perdería la función asociada a clientes, en este caso el suministro de gas a la estación de regulación y medida con los parámetros de calidad asociados. Este es un ejemplo claro de la importancia de analizar el equipo en su contexto operacional. Un fallo de cierre de la válvula no cortaría el suministro de gas en sí, de hecho, el problema estaría en que no se puede cortar el suministro. Sin embargo, el contexto operacional implicaría el cierre la válvula análoga más cercana (se muestra en la Figura 20), lo que irremisiblemente sí que cortaría el suministro de gas a toda la posición y por tanto a la estación de regulación de presión.

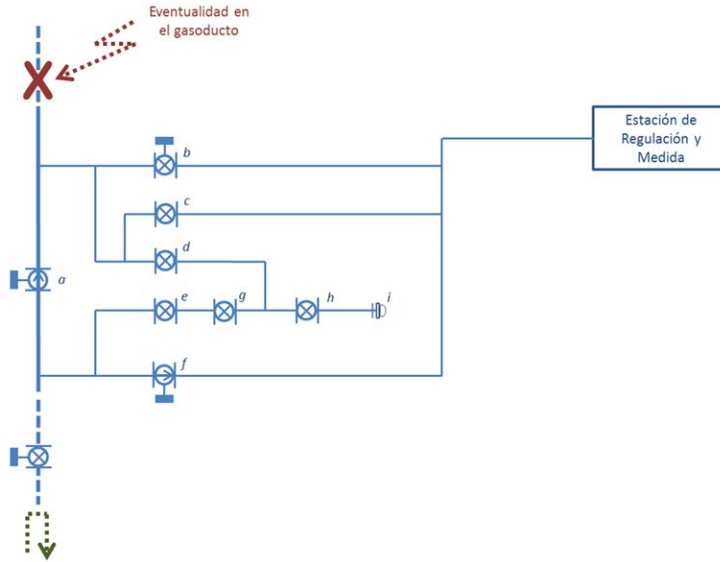


Figura 20; Contexto operacional ante fallo válvula "a"

De acuerdo con la descripción realizada se produciría un corte de suministro a clientes y por tanto el nivel de severidad definido sería "alto" en el criterio de calidad de servicio como se muestra en la Tabla 12.

Criterio de Calidad de Servicio	Niveles
<i>Corte de suministro a clientes</i>	<i>Alto</i>
Pérdida de los parámetros críticos de calidad del gas (odorización, presión, impurezas)	Medio
Pérdida de parámetros no críticos de calidad	Bajo
No afecta	No Impacto

Tabla 12; Valoración criterio Calidad de Servicio

*Valoración del criterio de disponibilidad;* se debe evaluar si ante un fallo de la válvula se perdería la función de la instalación en el que está ubicado en el equipo. Recordemos que tal y como se ha definido en el punto 2, la instalación tiene dos funciones: suministro de gas a la ERM (valorado ya en el criterio de calidad de servicio) y seccionamiento y corte de la red básica de gasoducto. La función de suministro de gas a la ERM se perdería completamente tal y como se ha analizado en el criterio de calidad de servicio. Sin embargo, debemos analizar el resto de funciones, aunque no afecten a clientes, en este caso seccionamiento y corte de la red básica de gasoducto. Bajo el supuesto sobre el que estamos realizando el análisis, también perdería dicha función, ya que seríamos incapaces cortar el flujo de gas y por tanto acotar la aportación a la fuga supuesta. Al perder por completo las dos funciones de la instalación, el nivel de severidad para el criterio de disponibilidad sería “muy alto” según se muestra en la Tabla 13.

Criterio de Disponibilidad	Niveles
<i>Indisponibilidad total de la instalación</i>	<i>Muy Alto</i>
Pérdida de la capacidad nominal de la instalación	Alto
Pérdida de la capacidad de reserva	Medio
No genera impacto	Bajo

Tabla 13; Valoración criterio Disponibilidad

*Valoración del criterio de coste de mantenimiento;* debemos cuantificar el coste medio de reparación asociado a los fallos típicos o más habituales de este tipo de válvulas. Al incluir en el análisis del equipo todos los componentes del mismo (en el ejemplo actual de válvula motorizada, tanto la válvula como el actuador) los expertos han cuantificado que el coste más habitual de reparación de este tipo de equipos es el nivel “medio” que engloba valores entre 600 € y 5.000 €, como se muestra en la Tabla 14.

Criterio de Coste de Mantenimiento	Niveles
Costes de mantenimiento derivados de la pérdida funcional superiores a 30.000 €	Muy Alto
Costes de mantenimiento derivados de la pérdida funcional superiores a 5.000 € e inferiores a 30.000 €	Alto
<i>Costes de mantenimiento derivados de la pérdida funcional superiores a 600 € e inferiores a 5.000 €</i>	<i>Medio</i>
Costes de mantenimiento derivados de la pérdida funcional inferiores a 600 €	Bajo

Tabla 14; Valoración criterio Coste de Mantenimiento

*Paso 6; Determinación de la severidad de una pérdida funcional*

Una vez analizadas todas las consecuencias en cada uno de los criterios de la metodología obtenemos la calificación global mostrada en la Tabla 15. En el caso que nos ocupa, y como ya en el primer criterio de seguridad industrial se ha valorado el fallo como inadmisibles tendríamos la puntuación máxima: 100

	Seguridad Industrial		Medio Ambiente		Calidad de Servicio		Disponibilidad		Costes de Mantenimiento	
	(35%)		(15%)		(25%)		(20%)		(5%)	
<i>Catastrófico</i>	<i>100</i>		Alta	100	<i>Alta</i>	25	<i>Muy Alta</i>	20	Muy Alta	5
Crítico	35		Media	15	Media	15	Alta	10	Alta	4
Moderado	20		<i>Baja</i>	5	Baja	5	Media	5	<i>Media</i>	3
Leve	0	No impacta	0	No impacta	0	Baja	0	Baja	Baja	1

Tabla 15; Valoración factores de consecuencia de válvula "a"

*Paso 7; Determinación de la frecuencia de fallo*

De esta valoración, la parte más sencilla podría ser sin duda la valoración de la frecuencia de fallo. Ésta es la parte más sencilla, siempre que se tenga un buen histórico de averías que permita la obtención de dicha información. Si se tiene dicho histórico, la consulta suele ser casi inmediata y por tanto suele ser uno de los aspectos que menos tiempo debe llevar en la aplicación de la metodología. Sin embargo, si no se tiene un buen histórico, ya sea por falta de documentación o por ser una instalación relativamente nueva, hay que buscar métodos alternativos. Se pueden aplicar varios métodos en función del rigor que se le quiera dar al análisis y de la importancia relativa del equipo analizado.

- Una opción sería basarse en el “know how” de los especialistas presentes en el análisis. Es posible que no puedan aportar un valor matemático exacto de las averías sufridas por un equipo. Sin embargo, una de las bondades de la metodología semi-cuantitativa es que se puede transformar una valoración subjetiva en un dato numérico. Por tanto, los especialistas sí que suelen conocer si sus equipos fallan mucho, poco, o nunca.
- Otra opción sería recurrir a bases de datos estándar que proporcionen dicha información (OREDA). Si bien es cierto que dicha información no refleja necesariamente la realidad de la instalación, es una base de datos de común aceptación por los especialistas de mantenimiento.

Fallos anuales	Clasificación	Escala
$4 < f$	Muy Alta	2
$2 < f < 4$	Alta	1,6
$1 < f < 2$	Media	1,2
$f < 1$	Baja	1

Tabla 16; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “a”

Así pues, ya sea por la obtención real del dato a través del GMAO, la estimación de los especialistas, o la asunción de un valor teórico de común aceptación, se debe proceder a la asignación de un peso a cada equipo. En el ejemplo práctico y

centrándonos la válvula indicada, se va a asumir un conocimiento histórico donde se observa que la frecuencia de fallo es muy inferior a 0,5 fallos anuales por lo que se clasifica en un nivel de frecuencia de fallo "bajo" como se muestra en la Tabla 16.

#### *Paso 8; Cálculo del nivel de criticidad*

Por último, se tiene que situar el elemento en la matriz de análisis que será la representación visual del nivel de criticidad obtenido por el elemento. En el eje de las abscisas, se sitúa el elemento en el cuadrante que refleje su valor de consecuencia. En este caso y al tener una valoración máxima de "100", se sitúa en el cuadrante que recoge las puntuaciones entre 90-100. En el eje de las ordenadas, se sitúa el elemento en el cuadrante que recoja la valoración de su frecuencia de fallo. En este caso al ser la menor puntuación se sitúa en el cuadrante inferior como se muestra en la Figura 21.

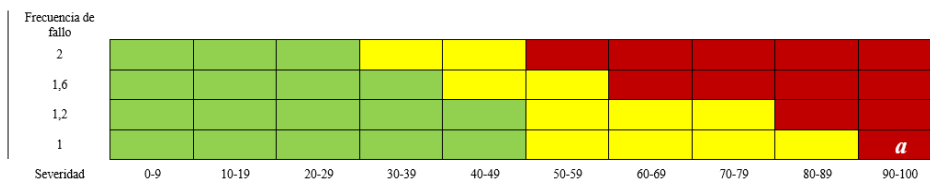


Figura 21; Situación válvula "a" en matriz de criticidad

#### **Análisis de la válvula "b"**

A continuación, y de cara a simplificar el documento, no se detallarán para cada equipo todos los puntos del análisis, sino que se realizará un resumen global de la función y por tanto una valoración genérica de la pérdida de consecuencia.

La función de la válvula "b", como ya ha ocurrido en la válvula "a", es doble. En primer lugar, es garantizar el suministro de gas a la estación de regulación de presión en caso de fallo en el suministro por el canal habitual tal y como puede observarse en la Figura 22. En segundo lugar, es cortar el suministro de gas a un tramo en el que pueda existir una avería o una fuga (en la Figura 22 puede observarse esta función en la válvula "f" análoga a la "b").

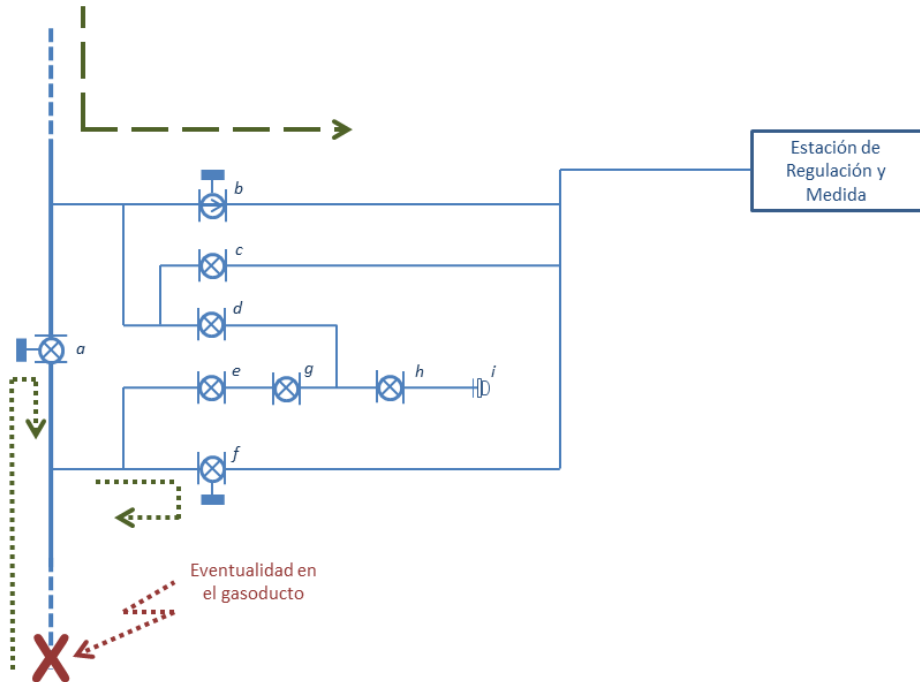


Figura 22; Alternativa suministro de gas en una red mallada

Una vez definidas las funciones de suministro y seccionamiento se debe suponer la necesidad de la utilización de esa válvula para un evento concreto. La pregunta sería: ¿Qué ocurriría si no se pudiera abrir dicha válvula cuando se necesita el suministro de gas por el camino alternativo? Y ¿Qué ocurriría si no se pudiera cerrar la válvula ante una eventualidad en el gasoducto?

En las consecuencias derivadas de los criterios de seguridad industrial y medioambiente para la función de suministro, no supone ningún impacto. Al no suponer, según la metodología, fallos concatenados, se debe suponer que las válvulas que garantizan el seccionamiento y corte del gasoducto ante una eventualidad (en el ejemplo de la Figura, las válvulas "a" y "f") funcionan. Por tanto, no corremos ningún riesgo de seguridad ni de impacto en el medio ambiente. Sin embargo, si analizamos la función de seccionamiento, sí que se observa que el fallo al cierre supondría un mayor aporte de gas (en concreto todo el contenido en nuestra instalación) a la eventualidad sucedida en el gasoducto. Se

conviene entre el equipo de trabajo que no se va a considerar dicha cantidad de gas relevante para un incidente de seguridad industrial, pero sí suficiente para darle una valoración mínima (en este caso “baja”) al factor de medio ambiente, ya que se incrementa el valor de gas emitido por el incidente. Como ya se ha definido en la metodología, ante una valoración diferente para varias funciones en un factor, se debe contemplar el más severo.

Analizando el criterio de calidad de servicio, sí que tenemos un impacto “muy alto”. En caso de que las válvulas “a” y “1” tuvieran que cerrar por una eventualidad, la válvula “b” sería el único camino posible para el suministro de gas a los clientes. Así pues, un fallo en dicha válvula supondría el cese inmediato de aportación de gas a la estación de regulación de gas y por tanto al cliente. En el caso del criterio de disponibilidad, recordemos que debemos analizar las dos funciones de la instalación.

El fallo de esta válvula sólo afecta a una de las funciones (suministro de energía) y no a la de seccionamiento y corte, ya que esta válvula no interviene en esa función. Por tanto, el nivel de severidad sería “alto”, y no “muy alto” como en el caso de la válvula “a” que afectaba a ambas funciones.

Por último, en el criterio de coste de mantenimiento mantenemos la valoración de la válvula “a”, ya que es la misma tipología de equipo. Analizando la frecuencia de fallo, también se observa que mantiene una tasa similar a la válvula “a” estudiada previamente, por lo que se situará de la misma manera en un nivel “bajo”. Se muestra el resumen de los análisis en las Tablas 17 y 18.



	Seguridad Industrial (35%)	Medio Ambiente (15%)		Calidad de Servicio (25%)		Disponibilidad (20%)		Costes de Mantenimiento (5%)	
Catastrófico	100	Alta	100	Alta	25	Muy Alta	20	Muy Alta	5
Crítico	35	Media	15	Media	15	Alta	10	Alta	4
Moderado	20	Baja	5	Baja	5	Media	5	Media	3
Leve	0	No impacta	0	No impacta	0	Baja	0	Baja	1

Tabla 17; Valoración factores de consecuencia válvula “b”

Fallos anuales	Clasificación	Escala
$4 < f$	Muy Alta	2
$2 < f < 4$	Alta	1,6
$1 < f < 2$	Media	1,2
$f < 1$	Baja	1

Tabla 18; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “b”

En la Figura 23 se representa la situación de la válvula “b” en la matriz de criticidad.

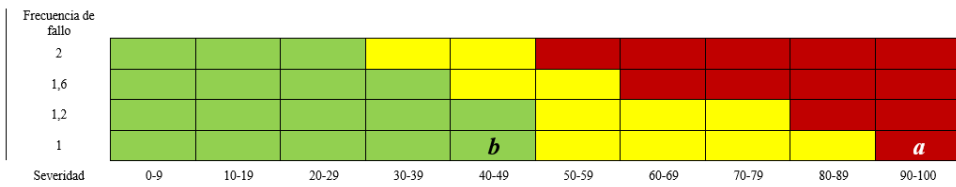


Figura 23; Situación válvula "b" en matriz de criticidad

### Análisis de la válvula "f"

Se pasa a analizar el equipo "f", pues desde un punto de vista funcional son exactamente idénticos. Para asumir que desempeñan la misma función, tenemos que suponer que la red básica de gasoducto esta mallada en el tramo que estamos analizando y por tanto el suministro de gas puede provenir por ambos tramos de la red básica de gasoducto, el tramo superior o el inferior. La función de dichas válvulas es por tanto garantizar el suministro de gas a la estación de regulación de presión en caso de fallo en el suministro por el canal habitual.

Al partir de este supuesto, se puede concluir que la valoración de severidad es exactamente igual a la realizada al ítem "b" pues tendría las mismas consecuencias ante los mismos posibles fallos funcionales.

Sin embargo, cuando se ha pasado a analizar la frecuencia de fallo, se ha detectado un valor alto. Cuando se ha extraído la información se ha detectado que, tras una primera avería detectada en una inspección funcional, el equipo volvió a fallar en la siguiente inspección. El motivo fue un mal mantenimiento en la primera ocasión. Esto provoca que, al tener dos fallos en el mismo año, el promedio obtenido sea de un fallo anual, y por tanto el nivel sea "alto".

Se da la circunstancia de que al obtener el nivel de criticidad y representarlo gráficamente en la matriz, no se consigue el resultado esperado. Siendo el mismo tipo de válvula que la analizada previamente (b) y exactamente con las mismas funciones, todo parecía indicar que tendrían el mismo nivel de criticidad, sin embargo, las intervenciones realizadas sobre un equipo hacen que este traspase un umbral de criticidad y por tanto pueda ser objeto de una estrategia de mantenimiento diferente. Se representa su situación en la matriz en la Figura 24.

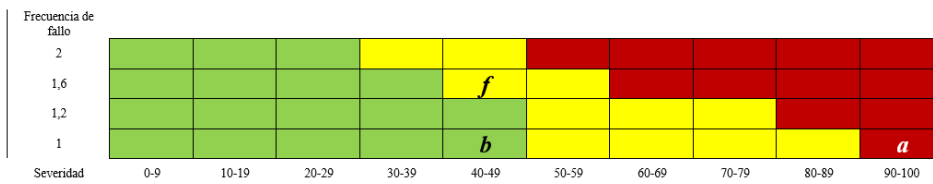


Figura 24; Situación válvula "f" en matriz de criticidad

### Análisis de válvula "e"

La función de la válvula "e" (manual y no motorizada) es poder realizar el by-pass de mantenimiento de la válvula "a". En caso de que hubiera que realizar una labor de mantenimiento y para garantizar el suministro de la red básica de gasoducto, la capacidad nominal debería circular a través de la "b" y la "f", pues las "e", "g" y "f" no tiene suficiente caudal para asumir todo el flujo. Así pues, ejerce la función de by-pass, pero simplemente para para igualar presiones y permitir operar la válvula "a" en tareas de mantenimiento. Además, permite sectorizar el nudo de válvulas a la hora de ventear (dejar fluir gas a la atmósfera) un tramo y por tanto limitar la pérdida de gas, ya que, aunque en el esquema no se perciba, muchas veces la distancia entre válvulas es muy elevada. Se muestra el esquema en la Figura 25.

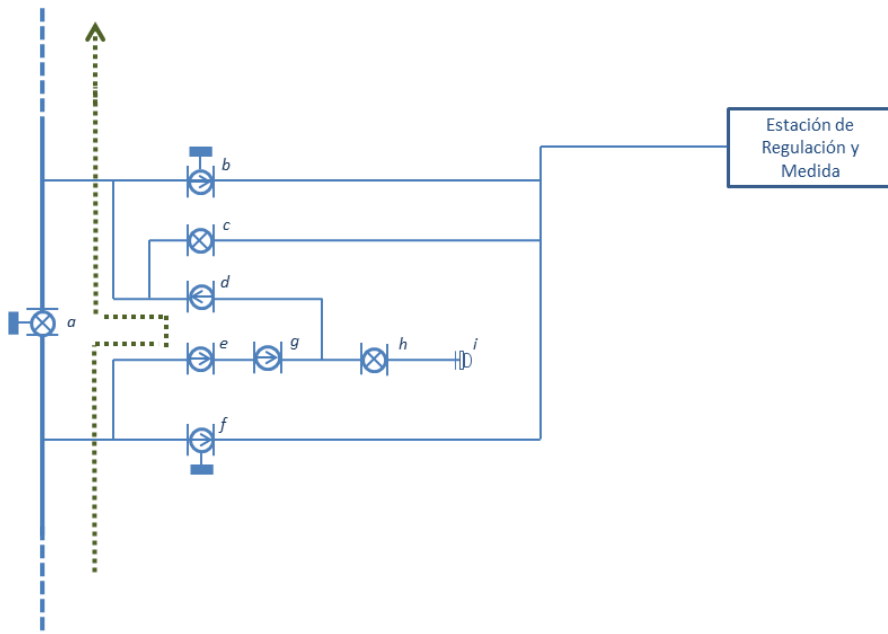


Figura 25; Función de by-pass

Valorando el criterio de seguridad industrial, el fallo no tendría ninguna consecuencia ya que su función no es cortar o permitir el flujo de gas, y por tanto ante una eventualidad no se requeriría del funcionamiento de estas válvulas. Sin

embargo, en la categoría de medio ambiente, sí que tendríamos impacto. Debemos suponer para esa valoración su función de seccionar el nudo de válvulas para un posible venteo de la posición. El no poder seccionar en una válvula en concreto, no impide ventear la posición (se podría seccionar gracias a otra válvula cercana) pero esto supondría una emisión mayor de gas a la atmosfera y por tanto una consecuencia en el factor de medio ambiente.

En los factores de calidad de servicio y de disponibilidad, el tener el by-pass inoperativo no tiene incidencia a la hora de cortar el suministro de gas a la red básica de gasoducto o de dar suministro a la estación de regulación de gas. Por tanto, la consecuencia en dichos factores tendría el mínimo nivel de severidad.

En el criterio de coste de mantenimiento, hemos valorado una reparación media de este tipo de válvulas. Al contrario que las analizadas anteriormente, son manuales y por tanto no tienen actuador. Su reparación es más barata. Al ser inferior a 600€, tenemos la severidad mínima en este criterio. La frecuencia de fallo es tremendamente baja en este tipo de equipos. El resumen de valoración se muestra en las Tablas 19 y 20 y la situación de la válvula en la matriz, en la Figura 26.

	Seguridad Industrial (35%)	Medio Ambiente (15%)	Calidad de Servicio (25%)	Disponibilidad (20%)	Costes de Mantenimiento (5%)				
Catastrófico	100	Alta	100	Alta	25	Muy Alta	20	Muy Alta	5
Crítico	35	Media	15	Media	15	Alta	10	Alta	4
Moderado	20	Baja	5	Baja	5	Media	5	Media	3
Leve	0	No impacta	0	No impacta	0	Baja	0	Baja	1

Tabla 19; Valoración factores de consecuencia válvula “e”

Fallos anuales	Clasificación	Escala
$4 < f$	Muy Alta	2
$2 < f < 4$	Alta	1,6
$1 < f < 2$	Media	1,2
$f < 1$	Baja	1

Tabla 20; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula “e”

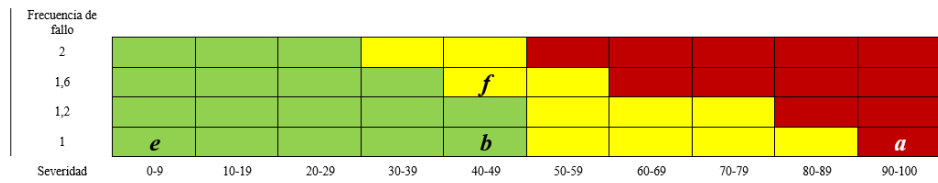


Figura 26; Situación válvula "e" en matriz de criticidad

Análisis de válvulas “g” y “d”

Dado que la función de las válvulas “g” y “d” son la misma que el ítem “e”, se ha procedido a asumir la valoración realizada en el apartado anterior para estos equipos. En este caso, el número de fallos también es el mismo que la válvula “e” (ningún fallo en los últimos dos años), luego su criticidad y su situación en la matriz de criticidad es exactamente la misma que el equipo “e” como se muestra en la figura 27.

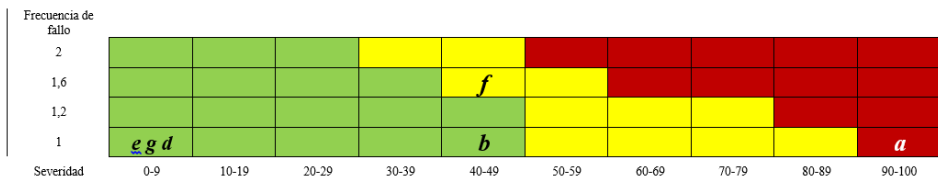


Figura 27; Situación válvulas "g" y "d" en matriz de criticidad

## Análisis de válvulas “c”

El objetivo de la válvula “c” (manual y no motorizada) es poder realizar el venteo de la posición de regulación de gas en caso de que fuera necesario realizar alguna intervención sobre la misma como se muestra en la Figura 28. En caso de fallo de las válvulas y por tanto no poder realizar la función de venteo, habría que buscar puntos alternativos para la evacuación del gas de la tubería.

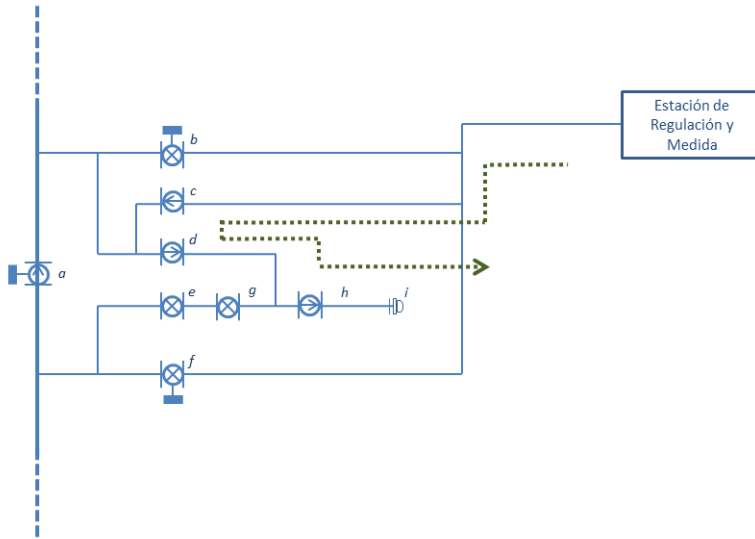


Figura 28; Función de venteo de la ERM

En el criterio de seguridad industrial, se tendrían consecuencias ante un fallo, ya que se tendría que buscar elementos alternativos para el venteo de gas. Al no poder ventear de una manera segura y necesitar de medios auxiliares con los riesgos asociados, se valora la severidad con un nivel “medio”. De la misma forma que se ha analizado en los equipos anteriores (e, g y d), al no poder actuar estas válvulas correctamente para ventear, habría que incrementar el gas emitido a la atmósfera mediante caminos alternativos. Así pues, se valoraría también con un nivel de severidad “medio” este criterio. En los criterios de calidad de servicio y disponibilidad, las válvulas no impiden ninguna de las funciones para las que ha sido diseñada la posición, luego se valoraría con el nivel mínimo de severidad. Por último, en coste de mantenimiento y al igual que en el caso anterior, al ser válvulas manuales el coste de mantenimiento medio es inferior a los 600 €. El resumen de

valoración se muestra en las Tablas 21 y 22 y la situación de la válvula en la matriz, en la Figura 29.

	Seguridad Industrial (35%)	Medio Ambiente (15%)	Calidad de Servicio (25%)	Disponibilidad (20%)	Costes de Mantenimiento (5%)				
Catastrófico	100	Alta	100	Alta	25	Muy Alta	20	Muy Alta	5
Crítico	35	Media	15	Media	15	Alta	10	Alta	4
Moderado	20	Baja	5	Baja	5	Media	5	Media	3
Leve	0	No impacta	0	No impacta	0	Baja	0	Baja	1

Tabla 21; Valoración factores de consecuencia válvula "c"

Fallos anuales	Clasificación	Escala
$4 < f$	Muy Alta	2
$2 < f < 4$	Alta	1,6
$1 < f < 2$	Media	1,2
$f < 1$	Baja	1

Tabla 22; Valoración de factor de frecuencia de fallo de válvula "c"

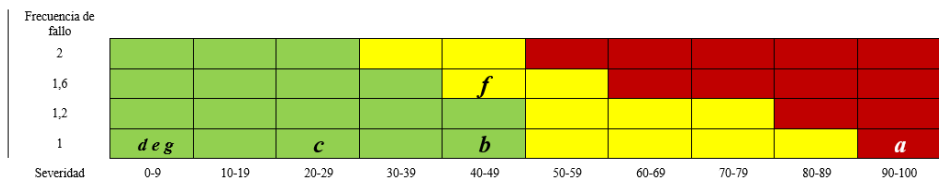


Figura 29; Situación válvula "c" en matriz de criticidad

## Análisis de válvulas “h” y “i”

Dado que la función de las válvulas “h” e “i” son la misma que el ítem “c”, se ha procedido a asumir la valoración realizada en el apartado anterior para estos equipos. En este caso, el número de fallos de la válvula “h” es el mismo que la válvula “c” (ningún fallo en los últimos dos años), luego su criticidad y su situación en la matriz de criticidad es exactamente la misma que el equipo “c”. Sin embargo, la válvula de venteo “i” ha tenido una intervención en los últimos dos años, luego tiene un nivel de fallo “medio”. Si bien su situación en la matriz de criticidad cambia con respecto a las otras válvulas con mismo nivel de severidad, y por lo tanto su criticidad, sigue bajo el umbral de los equipos no críticos.

La Figura 30 muestra el resultado final del ejemplo propuesto en el desarrollo de la tesis. Como puede observarse, una vez que se tiene de base la matriz de valoración de las consecuencias, y una buena base de datos de fallos históricos, el proceso de análisis de criticidad es sencillo y fiable. La representación gráfica es intuitiva y permite identificar de manera visual la importancia relativa de los activos en relación con el mantenimiento. En este caso se ha identificado cada válvula con una letra, que a su vez se ha representado en la matriz. Como podrá deducirse, en un análisis masivo de una gran instalación, la información de detalle queda en archivos adicionales, quedando sólo en la matriz el valor del sumatorio de los equipos que hay dentro de cada celda. Se mostrarán algunos ejemplos más adelante.

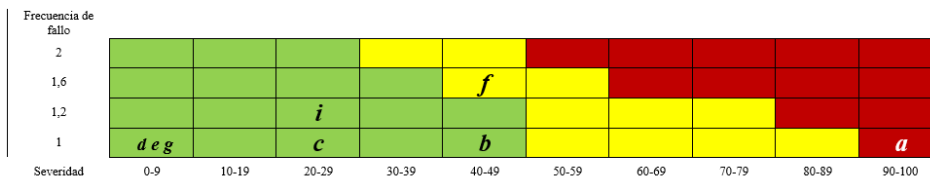


Figura 30; Matriz de criticidad de nudo de válvulas

### 3.1.1.5. Resumen de resultados de la línea de investigación

El objetivo de la presente línea era la adaptación de la metodología del análisis de criticidad para activos industriales, en concreto en el ámbito del gas natural, y validar su capacidad de aplicación práctica.

Durante el proyecto desarrollado en Enagás, y siguiendo la metodología descrita



anteriormente, se generaron cuatro matrices de consecuencia (Figura 31) para trabajar con los diferentes tipos de activos, de manera que se pudiera trabajar con las premisas más básicas de la metodología, especificando el entorno operacional del activo para el análisis, pero permitiendo un marco amplio para el análisis ágil de activos. En concreto se definieron matrices de consecuencia para:

- Plantas de regasificación
- Estaciones de compresión
- Estaciones de Regulación y Medida
- Almacenamientos Subterráneos

Cabe destacar que hay un activo también muy relevante para Enagás como es el gasoducto al que no hemos aplicado específicamente esta metodología, pues está más orientado a activos concentrados. Para activos lineales existen adaptaciones más específicas que utilizan el concepto de probabilidad en lugar del de frecuencia de fallo y son más específicos para este tipo de instalaciones.

Seguridad industrial : 38%		Medioambiente: 15%		Calidad de Servicio: 22 %		Disponibilidad: 20%		Costes de Manto.: 5%	
CATASTROFICO: CA CRITICO: CR MODERADO: MO LEVE O NO IMPACTO: LE		ALTO: A MEDIO: M BAJO: B NI: NO IMPACTO		ALTO: A MEDIO: M BAJO: B NI: NO IMPACTO		MUY ALTO: MA ALTO: A MEDIO: M BAJO: B		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	Efecto exterior a la instalación en zona habitable o vulnerable	A	No se puede extraer lo solicitado durante más de 4 hrs o no hay medición en la instalación.	A	Parada de planta. Pérdida total de la capacidad nominal superior o igual a 2hr.	MA	>30000 €	MA
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	CR	Impacto alto en la instalación mitigado con medios exteriores o daños en exterior en zona no vulnerable	M	No se puede inyectar lo solicitado durante más de 4 hrs o no se puede extraer durante menos de 4 horas; o hay medición pero la calidad de gas está fuera de especificaciones durante más de 4 hrs.	M	Parada de planta. Pérdida total de la capacidad nominal inferior a 2hr.	A	Mayor o igual a 5000<C<30000 €	A
Impacto alto en la instalación sofocado con medios propios; o lesión menor y reversible a trabajadores	MO	Impacto medio o bajo en la instalación mitigado con medios propios	B	No se puede inyectar lo solicitado durante menos de 4 hrs o la calidad de gas está fuera de especificaciones durante menos de 4 hrs.	B	Disminución capacidad de inyección o extracción cara al ciclo operativo del almacenamiento mayor o igual al 33% o pérdida de redundancia	M	Costes 600<C<5000 €	M
Impacto leve en la instalación sofocado con medios propios; o lesión leve que no afecta al desarrollo del trabajo No impacto	LE	No impacto	NI	No impacta	NI	Disminución capacidad de inyección o extracción cara al ciclo operativo del almacenamiento menor al 33%	B	Menos de 600€	B

Figura 31; Ejemplo de matriz de consecuencia

Habiendo concluido el primer objetivo de la línea que era la adaptación de la metodología, y con todos los criterios necesarios para el análisis, la validación de su capacidad de aplicación práctica se realizó mediante su aplicación en sí. El procedimiento se probó y matizó mediante el análisis de criticidad en una serie de

instalaciones piloto (una de cada tipo de activo). En estas instalaciones piloto se fueron definiendo algunos aspectos clave del proyecto no relacionados con la metodología. Los perfiles del equipo de trabajo, número de integrantes óptimos de la sesión o medios informáticos a utilizar, son algunos de los aspectos que si bien no conforman aspectos que podrían formar parte estricta de la metodología, fueron muy relevantes para el desarrollo del proyecto.

En la parte estrictamente metodológica, el proceso de pilotaje también permitió matizar e incluso completar parte de las definiciones o ponderaciones definidas en la fase inicial. Fue el proceso donde se pasó de la parte más teórica a la parte más práctica y por tanto hubo que realizar ciertos ajustes. Una vez realizada esta fase, se realizó la extensión al resto de activos de Enagás.

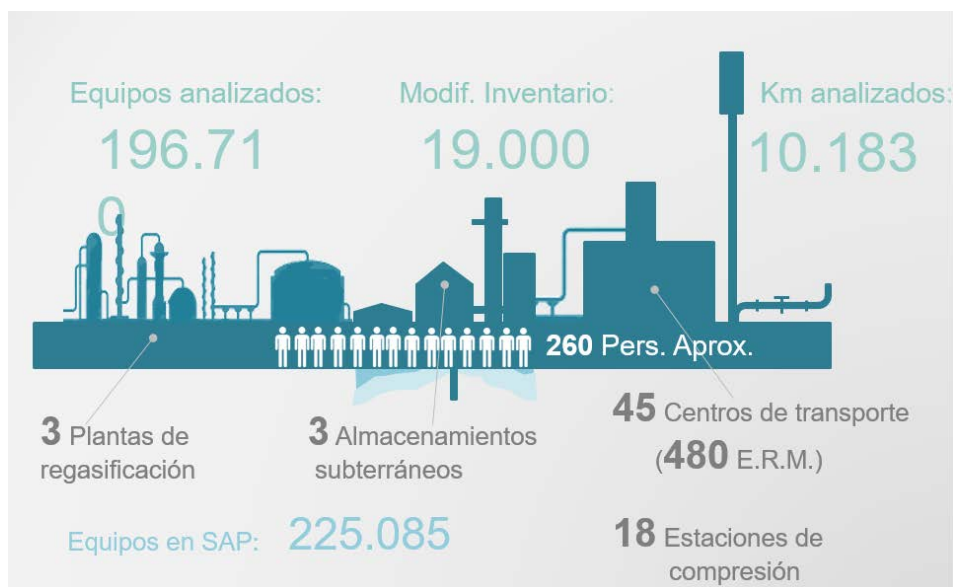


Figura 32; Cifras principales del proyecto de criticidad

Dicho proyecto constó del análisis de criticidad de todos los activos de la compañía. Se analizaron cerca de 200.000 activos en un año y medio de trabajo con 4 equipos en paralelo. Fue un proyecto en el que participaron más de 250 profesionales de Enagás y con el que se generó una matriz de criticidad para cada instalación de la compañía. Se han tratado de recoger las cifras más significativas en la Figura 32. En

concreto una matriz para cada:

- Planta de regasificación (3)
- Centro de trabajo de instalaciones de transporte de gas (45)
- Estaciones de compresión (18)
- Almacenamientos subterráneos (3).

Así pues, se generaron un total de 79 entregables con toda la información detallada. No sólo la matriz de criticidad en sí (se puede ver un ejemplo en la Figura 33), sino la valoración realizada por los profesionales de la compañía del impacto de un hipotético fallo funcional en cada una de las consecuencias analizadas. Como se verá posteriormente, dicho detalle es crítico para el uso efectivo del resultado de este análisis, y por tanto para que realmente se integre en una gestión efectiva basada en riesgo.



Figura 33; Ejemplo de matriz de criticidad en Enagás

### 3.1.2. Integración de análisis de criticidad en la estrategia global de gestión de activos para optimización de mantenimiento

Puede que el reto más importante de todo el bloque relacionado con la gestión del riesgo sea entender que la aplicación del análisis de criticidad no produce ningún

impacto en la compañía por sí mismo. Tener un entregable como las matrices de criticidad, no proporciona más que las herramientas necesarias para posibles trabajos. Tratar de justificar o implantar un proyecto como el descrito previamente sin integrarlo dentro de un modelo de gestión, es una tarea completamente inútil. Por eso ha sido tan importante para Enagás desarrollar y adaptar cada una de las metodologías dentro del modelo integral de gestión de mantenimiento. Y es de ese modelo del que se parte para analizar la utilidad de la información obtenida del análisis de criticidad y, por tanto, del que obtenemos las propuestas de cómo utilizar la segmentación basada en riesgo para la optimización de los planes de mantenimiento.

### 3.1.2.1. Información previa

Antes de comenzar a describir y valorar las acciones más inmediatas a realizar en la estrategia de mantenimiento derivadas del análisis de criticidad, parece conveniente aclarar algún concepto más sobre la herramienta de análisis de criticidad y su representación gráfica (la propia matriz).

En primer lugar, es importante recordar que la matriz es una herramienta dinámica. El resultado anteriormente mostrado, fruto del trabajo de los profesionales de Enagás, corresponde a una situación de la planta concreta y con unos datos concretos tomados durante el análisis. Parece pues obvio advertir que se debe tener en consideración las posibles alteraciones de la matriz o en que podría cambiar en caso de que el análisis hubiera sido realizado en otro momento o por otros profesionales. Esta última valoración, a pesar de ser significativa debe obviarse. Al ser un método semicuantitativo lleva implícita una parte de valoración subjetiva por los profesionales que conformen el grupo de trabajo. Sin embargo, por la propia definición del método sería imposible eliminar este elemento de subjetividad que hace que con la misma instalación y metodología pudiera obtenerse como resultado una matriz diferente. Tal y como se ha dicho, dado que estas diferencias serían mínimas y que no es un factor que se pueda eliminar, no se hará más hincapié en él. Así pues, un elemento en la matriz puede desplazarse de manera horizontal (si varía la valoración de los factores de consecuencia) o de manera vertical (si varía la frecuencia de fallo) cuando se reevalúe la matriz. Parece conveniente entonces dejar fijado de antemano que periodo se considera significativo para actualizar la matriz y por tanto observar posibles desviaciones.

*¿Cuándo puede entonces un elemento desplazarse de manera horizontal?* Si se analizan detalladamente los factores que se han valorado para determinar la consecuencia de fallo de un equipo y por tanto la situación de éste en la horizontal de la matriz, nos damos cuenta de que son factores intrínsecos al diseño de la planta y por tanto su valoración no debería cambiar mientras no exista un rediseño que implique al elemento en cuestión. El rediseño puede abarcar desde la inclusión de nuevos equipos (equipos de respaldo, nuevas configuraciones) hasta una nueva especificación que defina nuevos materiales, inclusión de nuevos sistemas de seguridad...

*¿Cuándo puede entonces un elemento desplazarse de manera vertical?* En este caso el análisis es más sencillo, pues existe un único factor: la frecuencia de fallo. Aquí ya no influye tanto el diseño como la estrategia de mantenimiento. Según se varíen las políticas de mantenimiento y se opte más por el mantenimiento predictivo, el llevar el equipo a rotura, o cualquier otra estrategia, esto podrá hacer variar la posición de un equipo en la matriz en su vertical.

Así pues, la ubicación de los elementos en la matriz, y por tanto su criticidad, son susceptibles de variar a lo largo del tiempo. Si bien queda claro que la consecuencia puede variar en función a rediseños, y su cambio en la valoración está más acotado, el valor de la frecuencia de fallo es susceptible de cambiar casi en cualquier momento dependiendo del número de averías. Sin embargo, los cambios de posición, sobre todo si son en gran número es lo que va a determinar el impacto de las medidas relacionadas con el modelo. Es por ello que tampoco interesa tener una matriz viva en tiempo real, pues costaría mucho conocer en base a que matriz se han tomado determinadas decisiones. Las decisiones en mantenimiento tienen mucha inercia, y por eso se decide acotar los periodos en los que actualizar dicho valor. En el caso de Enagás, se ha decidido que dicha actualización se realice de manera anual, de manera que cada instalación tiene una matriz de criticidad que no varía a lo largo del año.

### 3.1.2.2. Esquema de metodologías relacionadas propuestas

La adaptación del modelo de gestión de mantenimiento desarrollado por Enagás plantea un grupo de metodologías como acciones derivadas de los resultados de la matriz de criticidad. Se muestran de manera esquemática en la Figura 34.

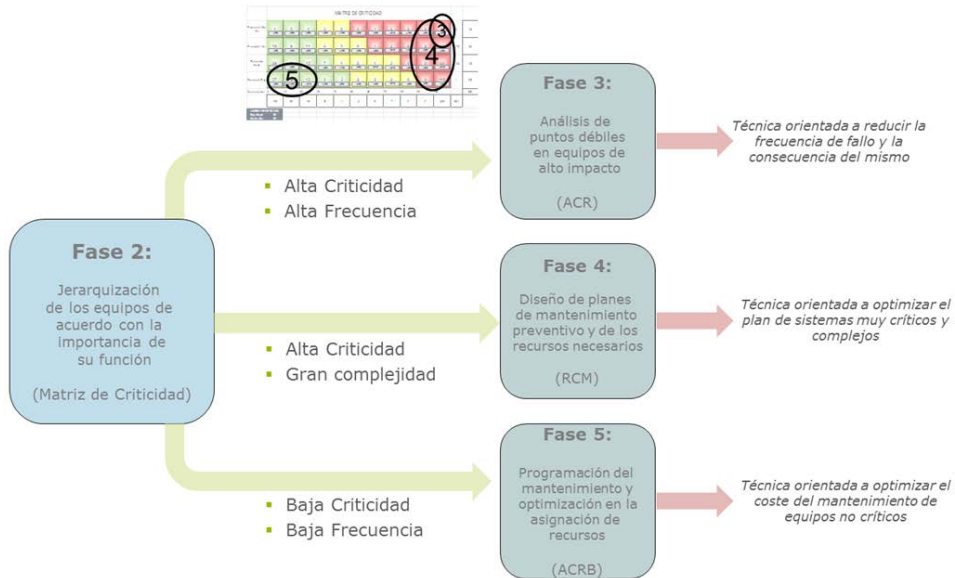


Figura 34; Propuesta de metodologías derivadas del análisis de criticidad

Como se puede observar, el método propone una técnica específica para los diferentes equipos según se encuentren situados en la matriz resultante del análisis de criticidad. Relacionándolo con la explicación dada anteriormente, cada una de las técnicas va orientada a mover al equipo a la situación de menor consecuencia y en la medida de lo posible a la de menor frecuencia de fallo. De hecho y si se echa la vista atrás a recordar el modelo en el que se basa el análisis, el objetivo de las técnicas no es obviamente mover a un elemento en la matriz, sino las consecuencias de hacerlo. Conviene no perder de vista las implicaciones que según el modelo tiene cada técnica y su ubicación en el modelo (Figura 35).

Al observar detenidamente de nuevo el modelo, se puede ver que la técnica de ACR se encuentra en la zona definida como zona de eficacia. Es decir que dichas medidas están orientadas a evitar fallos y maximizar disponibilidad, sin centrarnos en costes. Ese es el objetivo final y verdadero, y con la herramienta propuesta (ACR), se consigue al desplazar un elemento en la matriz, de la esquina superior derecha, a la parte inferior e izquierda en función de las posibilidades.

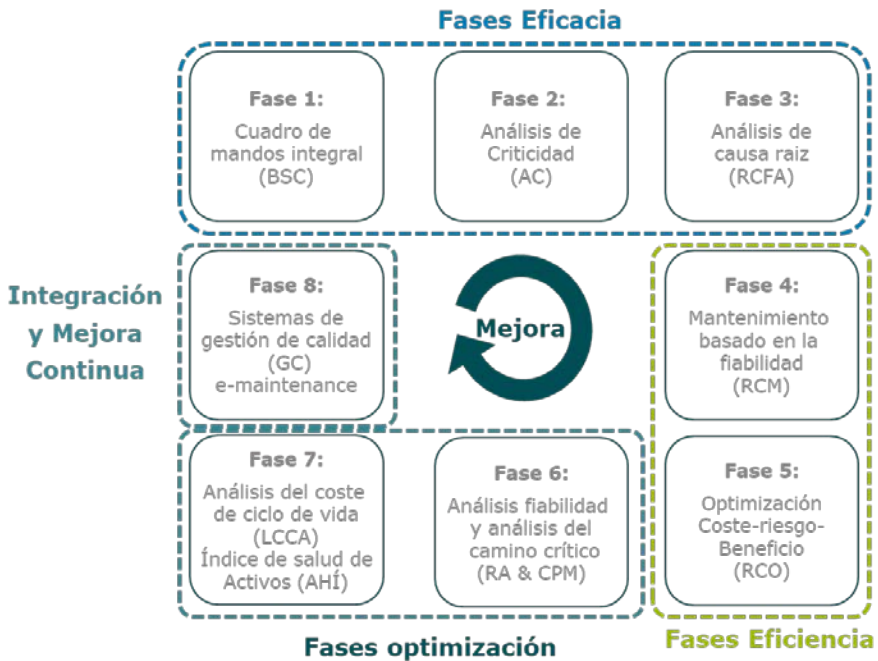


Figura 35; Metodologías propuestas por el MGM-GAS

En cuanto al RCO (Risk Cost Optimization), se centra mucho más en el aspecto económico y no tanto en desplazar elementos en la matriz, sino en aprovechar aquellos con poca criticidad. Se desarrollará esto más adelante.

El análisis RCM está orientado a optimizar el plan de mantenimiento de equipos muy complejos con una gran cantidad de modos de fallo y muchos tipos de intervención. Al igual que el ACR, el RCM tiene como objetivo primerio ser capaz de moderar la criticidad de un equipo. Dado que lamentablemente no siempre es posible un rediseño que mitigue las consecuencias de un fallo (o bien sencillamente no es rentable), al menos garantiza un análisis de detalle del funcionamiento del activo, lo que permite un rediseño global de su plan de mantenimiento. El resultado final son mantenimientos más tecnificados, basados en monitorización (44) y con eliminación de tareas superfluas.

Se va a realizar una breve descripción de cada metodología para luego mostrar el ejemplo de aplicación de la estrategia en Enagás.

### Análisis Causa-Raíz

Existe numerosa bibliografía que explica en qué consiste el análisis causa-raíz y que puede consultarse, aunque se va a describir brevemente el método para entender la implicación de trabajo que supone cada análisis y en qué casos es realmente eficaz.

Según algunos autores (45), el análisis de causa raíz es un detallado método de análisis y solución de problemas que utiliza como método central el árbol de causa raíz de fallo, y se basa en el proceso deductivo y de prueba de las hipótesis de la causa, que conducen al origen del incidente. Los hechos deben estar soportados con pruebas documentales o experimentales que quedarán documentadas. No puedes ser rumores ni suposiciones. El ACR se aplica generalmente en incidentes puntuales de equipos críticos o relevantes para la organización cuando se producen fallos repetitivos (en el caso que nos ocupa se hará en equipos que cumplan ambos requisitos), identificando las deficiencias de las estrategias de mantenimiento e incluso si pudieran tener relación con la operación.

La metodología del ACR es de simple realización y resultados muy eficaces. Tan sólo requiere de un equipo de cierta cualificación y dedicar el tiempo necesario para el análisis y su documentación. Normalmente y si existe cierto conocimiento de la técnica, además como acceso a la información de forma rápida (mediante un GMAO) con una reunión de entre 2 y 3 horas puede realizarse el análisis de un equipo sencillo. A pesar de no llevar demasiado tiempo (en comparación especialmente con el análisis de criticidad) sí que se ha podido constatar la recomendación hecha por el método, de que dicha metodología tiene especial sentido en equipos de alto impacto (a los que se quieren dedicar los esfuerzos) y de alta frecuencia de fallo. Sobre todo, porqué es en estos equipos en los que a través de la información técnica aportada por los informes de los fallos, se pueden realizar análisis y proponer mejoras.



Lo habitual en este tipo de análisis, tal y como se ha explicado anteriormente, es conseguir que mediante un rediseño podamos desplazar el equipo en la horizontal de la matriz limitando las consecuencias de un fallo de éste, consiguiendo el efecto propuesto en la Figura 36. Especialmente sencillo en caso de poder duplicar el equipo y por tanto limitar los efectos de un fallo mediante las redundancias.

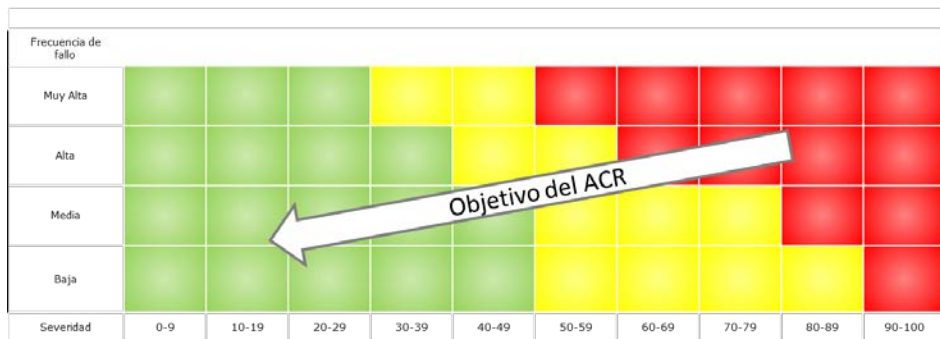


Figura 36; Objetivo del ACR en la matriz de criticidad

### Mantenimiento centrado en fiabilidad (RCM)

Lo que propone la adaptación de mantenimiento para equipos críticos es una revisión y diseño específico equipo por equipo. Su objetivo es, siempre que merezca la pena, diseñar un plan concreto para un activo concreto.

Una adaptación como la que se está proponiendo, va a asegurar de una manera metodológica que el plan es exactamente el que técnicamente garantiza la mayor fiabilidad del activo. Sin embargo, el estudio requiere una gran cantidad de medios, humanos y económicos para garantizar su mejor resultado. Esta es la razón por la que se según se describe en el capítulo de análisis de criticidad, el modelo propone invertir en dicha metodología sólo en equipos activos que se sitúen en la zona más crítica de la matriz.

La metodología propuesta por el MGM es el Mantenimiento Centrado en Fiabilidad, o como es más conocida, el RCM. El RCM es una metodología de orientada a mejorar un plan de mantenimiento en la cual se busca optimizar la fiabilidad operacional de un sistema. Mediante un equipo de trabajo multidisciplinar, se revisa el entorno operativo del sistema, documentando los diferentes equipos que lo conforman, así como los posibles fallos que pueden

ocurrir. A partir de ahí, se establecen las actividades más efectivas en función de la criticidad de los equipos que componen el sistema, y se establece un plan de mantenimiento que asegure los máximos niveles de fiabilidad del sistema en su conjunto, teniendo en consideración las consecuencias que tendrían los modos de fallos de estos activos a la seguridad, el medioambiente y la operación de la instalación.

El mantenimiento centrado en fiabilidad es una metodología que aporta valor en sí misma, al repasar en profundidad todas las tareas de mantenimiento garantizando la máxima eficacia de los planes asociados. Integrar la metodología en un modelo global, ayuda a focalizar los esfuerzos y aplicar un proceso muy intensivo en recursos, sólo en aquellos lugares donde tiene sentido aplicarlo. No todos los activos tienen porqué tener un plan de mantenimiento que se base en RCM y es ahí donde la matriz de criticidad va a aportar un valor fundamental a la hora de enfocar donde debe aplicarse este tipo de mantenimiento y donde es rentable invertir recursos humanos y económicas en un proyecto de revisión de mantenimiento.

#### Análisis Coste Riesgo Beneficio (ACRB)

Al igual que la técnica de ACR tenía como objetivo fundamental conseguir la eficacia del equipo y por tanto disminuir su frecuencia de fallo y en la medida de lo posible las consecuencias de éste, el ACRB busca como objetivo principal una optimización de costes en función de la estrategia de mantenimiento.

No se debe olvidar que, según lo comentado en la introducción, todo el modelo que se está desarrollando en este proyecto está basado en el concepto de “gestión de activos” que lo que conlleva es una gestión del riesgo frente a las medidas de eficiencia. O dicho de una manera más coloquial, optimizar costes donde el riesgo es asumible. Quizás ésta es la técnica que mejor define este concepto.

Durante mucho tiempo los planes de contención de costes han afectado al mantenimiento de manera que en muchos casos y de forma casi irresoluble ha derivado en la descapitalización de los equipos. Muchos de estos planes se han puesto en marcha sin un análisis riguroso de los riesgos y por tanto la estrategia de mantenimiento siempre ha ido por detrás de la cifra de ahorros requerida por la compañía. Así pues, el gestor manejaba esta cifra ahorrando donde su experta opinión consideraba. Lo que refleja la Figura 37 es el riesgo que implica sostener

una política de excesivo ahorro en costes en el ciclo de vida de los equipos. Una estrategia deslavazada de ahorro de costes conlleva a medio plazo la necesidad de cambiar los equipos o invertir para realizar “overhauls” que lleven al equipo a una situación de funcionamiento estable.

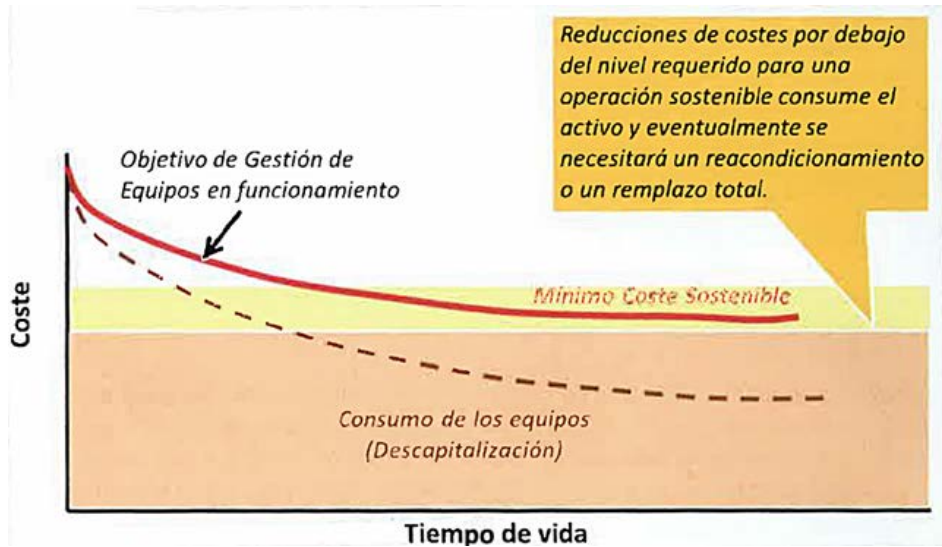


Figura 37; Impacto de reducción de costes en el ciclo de vida

Bajo esta premisa de ahorro sostenible, la optimización coste riesgo beneficio trata de buscar el punto óptimo de gasto en mantenimiento para cada equipo. En un lenguaje más técnico, el objetivo es preservar el funcionamiento de los activos, maximizando su desempeño operacional y su rentabilidad económica, mediante la aplicación de planes de mantenimiento que minimicen los riesgos derivados de los modos de fallo en un contexto operacional concreto. En un lenguaje más coloquial, buscar la estrategia de mantenimiento más económica para un nivel de servicio requerido.

El método en sí, une los conceptos asociados al riesgo (tiempo hasta el fallo, probabilidad de ocurrencia de éste y consecuencias económicas) con los costes y tiempos propios de intervenciones preventivas, para analizar en qué momento alcanzamos el coste óptimo en función de cada equipo.

Existiría la posibilidad de realizar una formulación de ACCV (Análisis de Coste del Ciclo de Vida) para cada activo. Sin embargo, el modelo teórico es complejo y requiere de una inversión significativa de tiempo para realizarlo en todos los equipos de una planta. Así pues, se requiere la necesidad de simplificar el modelo. Para ello, se parte de un estudio realizado en la industria aeronáutica y mostrado en la Figura 38 que trata de establecer los diferentes modelos de fallos y la proporción entre ellos.

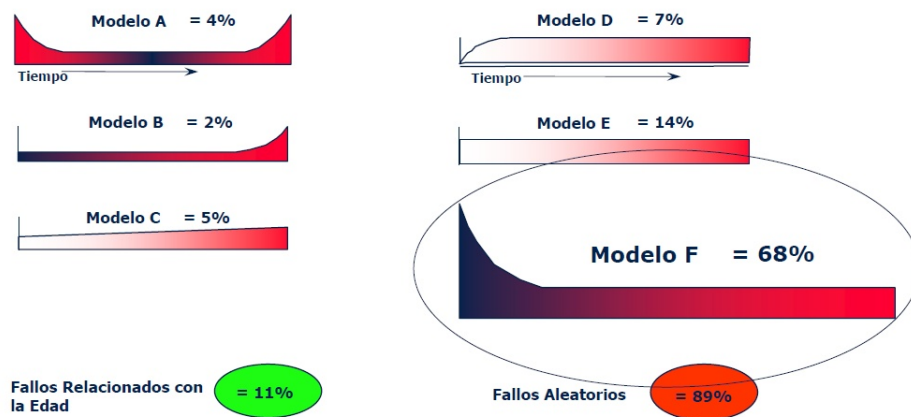


Figura 38; Modos de fallo en el ciclo de vida

Este estudio ha servido mucho para diferentes avances en la gestión de mantenimiento, ya que ha sido la prueba evidente de la desmitificación de la "curva de la bañera". Habitualmente era reconocido en el mundo del mantenimiento que el modelo de fallo más extendido en la industria era el modelo A, denominado curva de la bañera, basado en que la mayoría de los fallos de los equipos eran "natales" (debido a mal montaje o a fallo de fabricación de la pieza o equipo) o por "envejecimiento" (debido al desgaste de las piezas). Esta asunción derivó en el desarrollo del mantenimiento preventivo basado en tiempo o en horas de funcionamiento. El objetivo era restablecer los elementos de desgaste y evitar por tanto los fallos por envejecimiento. Sin embargo, se daba la paradoja de que al eliminar (en teoría) los fallos por envejecimiento, devolvías al equipo a un estado en el que aumentaban los fallos "natales" al haber intervenido sobre el equipo y sustituido piezas por mantenimiento cuando a veces sencillamente no era necesario.

Con la expuesto en la figura 38 se puede observar como en realidad los modelos de fallo de los equipos son muy diversos y muy pocos son los equipos que cumplen estrictamente el modelo de la curva de la bañera. Por el contrario, un 89% de los equipos responden a un modelo aleatorio de fallos una vez superada la fase natal. Con una lógica inmediata, parece simple deducir que, una vez superada la fase inicial de funcionamiento, cuanto menos se toque el equipo menos posibilidades hay que este falle.

Así pues, sólo queda discernir (simplificando el modelo) dos aspectos. Toda vez que has superado la fase inicial de funcionamiento e imaginando que tratáramos de espaciar al máximo las intervenciones preventivas (e incluso eliminarlas llevando al elemento a correctivo), habría que analizar si el coste de una posible intervención correctiva es rentable y por tanto es una estrategia lógica, o sería de un coste demasiado elevado, con lo que la estrategia no sería rentable. Lo que se haría sería realizar una asunción técnica para una optimización económica.

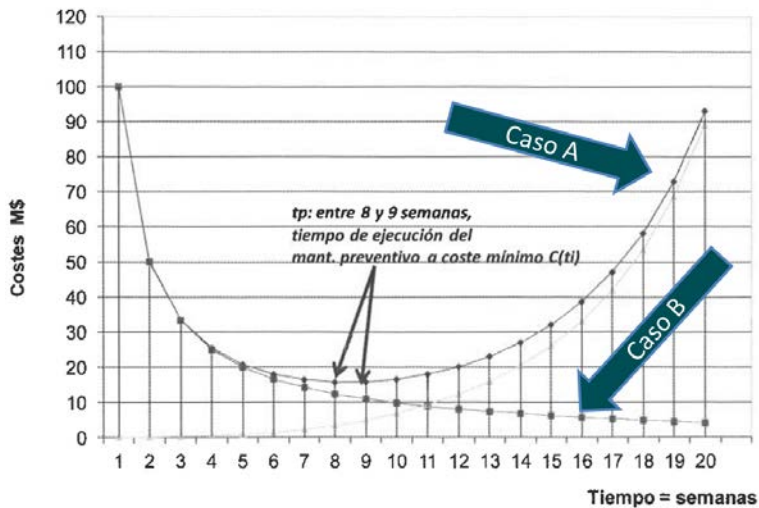


Figura 39; Cálculo de tiempo óptimo de periodicidad de mantenimiento

En la Figura 39 se puede ver los dos posibles ejemplos derivados de una modificación de la estrategia de mantenimiento preventivo a intervalos fijos. En el caso A se observa que la falta de dicho mantenimiento acabaría derivando en un

incremento del coste ante un posible fallo haciendo dicha estrategia no rentable. En el caso B nos encontramos en un caso en el que realmente el coste justifica una estrategia de llevar el elemento a rotura, pues la consecuencia del fallo y el coste de reparación es asumible en el momento que suceda.

Así pues, la decisión del proyecto es optar por una versión simplificada del ACRB en la que, basándonos en los conceptos anteriormente descritos de la técnica, ésta no se aplique de una forma estricta, sino que se ejecute de modo simplificado con dos líneas de trabajo muy sencillas:

- Evaluar la posibilidad de llevar la estrategia de mantenimiento a rotura en aquellos que sea posible
- En aquellos que no sea posible, evaluar la posibilidad de modificar la frecuencia de las intervenciones para reducir costes.

Debe recordarse que, en este punto del proyecto, la técnica de ACRB se centra fundamentalmente en el análisis económico, así que, desde un punto de vista de riesgo, este análisis debe realizarse en los equipos de baja criticidad y baja frecuencia de fallo para asegurarnos que dicho fallo es un riesgo “asumible” por la empresa. Además, y tal como se comentó en capítulos anteriores, ante un cambio de estrategia de mantenimiento y en el peor de los casos nuestros equipos se moverían en la vertical de la matriz, pero nunca en la horizontal. Dicho de otra forma, un equipo nunca se haría crítico por un cambio de estrategia de mantenimiento pues las consecuencias de un fallo de éste, son invariables. En el peor de los casos simplemente aumentaría su frecuencia de fallo

### 3.1.2.3. Aplicación de la estrategia en Enagás

A continuación, se van a describir como se ha implantado la estrategia propuesta en Enagás, y los principales resultados que se están obteniendo. Se va a realizar de manera muy esquemática, pues si bien existe mucha información de detalle de la aplicación de las diferentes metodologías, cada una tendría una gran extensión en misma y se entiende que no es alcance de la línea de investigación de la tesis.

Tal y como se ha adelantado, la estrategia de optimización de mantenimiento propuesta por el MGM y adoptada por Enagás, incluye las metodologías de ACR, RCM y ACRB. Sin embargo, existen otros criterios que definen la estrategia más allá de la selección de la metodología y que se van a describir a continuación. Estos factores serían:

- A que equipos concretos aplicar la metodología
- Con que frecuencia o bajo qué situación realizarla
- Como medir el impacto de los beneficios de la aplicación

El ACR se ejecuta por Enagás siempre que haya un activo situado en la zona crítica de la matriz, y que además tenga una frecuencia de fallo alta o muy alta como se muestra en la Figura 40. La razón por la que se excede el escenario propuesto teóricamente por el MGM (que se centra sólo en las celdas más extremas de la zona superior derecha de la matriz) es porqué la empresa tiene la capacidad de asumirlo, y por tanto tener un control muy significativo de este tipo de activos.

Frecuencia de fallo												
Muy Alta							Ámbito de aplicación del ACR					
Alta												
Media												
Baja												
Severidad	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-100		

Figura 40; Ámbito de aplicación del ACR en matriz de criticidad

Una vez realizada una primera batería de análisis ACR al implantarse el proyecto, no son tantos los equipos críticos que tengan un número de fallos tan significativos. Generalmente este tipo de equipos ya vienen preparados por diseño para evitar esta situación, y por tanto esto limita mucho el número de veces que se requiere aplicar la metodología. Los análisis se hacen una vez se detecta la situación. Como hemos explicado previamente, la actualización del valor de la frecuencia de fallo en el GMAO se realiza con periodicidad anual, y es en ese momento en el que se identifican estos activos y se lanzan las diferentes líneas de trabajo. Para garantizar el impacto de la aplicación del ACR, se hace el posterior seguimiento con el número de averías y de incidencias del equipo en cuestión, siendo el objetivo que dicho activo no vuelva a situarse en la misma zona de la matriz al año siguiente.

Al igual que el ACR, la aplicación del RCM en Enagás tiene alguna peculiaridad derivada de la política de mantenimiento de la compañía. Recordar que el RCM está orientado a sistemas complejos con múltiples modos de fallo. Es decir, que dentro de los activos críticos en los que se centraría la metodología, habría que buscar aquellos cuyo plan de mantenimiento fuera realmente complejo y extenso, pues el objetivo es rediseñarlo. Se da la situación de que la mayoría de los activos realmente críticos de acuerdo con los factores de consecuencia definidos por Enagás, están relacionados con sistemas de seguridad (detectores de incendios, rociadores, cuadros eléctricos...). Estos activos no suelen ser complejos y su plan de mantenimiento viene marcado de hecho muchas veces por normativa legal. Así pues, también se ha adaptado el alcance propuesto inicialmente por el modelo y se ha abierto a sistemas semicríticos, siempre que sean sistemas muy repetitivos como se muestra en la figura 41.

Frecuencia de fallo										
Frecuencia de fallo	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-100
Muy Alta	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo
Alta	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo
Media	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Ámbito de aplicación del RCM				
Baja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde					
Severidad	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-100

Figura 41; Ámbito de aplicación del RCM en matriz de criticidad

Esta decisión se toma tratando de rentabilizar al máximo el proceso. Cuanto más impacto tenga el rediseño del plan de mantenimiento, más sentido tendrá invertir en cambiarlo. Dentro de Enagás, los planes que más se emplean son los utilizados en la red de transporte, pues es donde se sitúan los sistemas y equipos más repetitivos. De esta manera, cambiar el plan de mantenimiento de cualquier sistema de una ERM, de las que existen más de 500 a lo largo de toda la geografía nacional, permite maximizar los beneficios de la metodología. Por esta razón se ha comenzado con sistemas críticos o semicríticos de la Dirección de Transporte. En este caso, el trabajo se realiza exclusivamente una vez por sistema, y de manera secuencial por un mismo equipo de trabajo, de manera que se van revisando uno a uno dichos sistemas (con un ritmo de 2 sistemas anuales) hasta que se revisen



todos los considerados. En este caso el impacto es ligeramente más difícil de medir, ya que no se trata tanto de evitar fallos que estén sucediendo, sino de garantizar que el plan de mantenimiento es robusto. Por ello también perseguiremos el indicador de incidencias y frecuencia de fallo, pero en niveles inferiores a los que se siguen en el ACR. De hecho, al ser activos críticos o semicríticos, no se debe permitir que superen el nivel más inferior de la matriz de criticidad, que se corresponde con una frecuencia de fallos baja.

Por último, se va a tratar la aplicación del ACRB, que sin duda es desde un punto de vista puramente económico la metodología que más impacto tiene en su aplicación. Especialmente en aquellas empresas que, por una cultura de aversión al fallo, tienen unos planes de mantenimiento excesivamente centrados en el preventivo periódico. Cuando de alguna manera se sobre mantiene mediante programas preventivos, se acaba desconociendo cual es el tiempo estimado hasta el fallo, y por tanto es difícil optimizar el periodo óptimo de planificación del mantenimiento. Lo que permite el ACRB es hacer una aproximación gruesa mediante sucesivas iteraciones en las que se irá ajustando la periodicidad de las actividades de mantenimiento en aquellos equipos que, por su baja criticidad, es admisible que suceda una avería.

Así pues, existen numerosas posibilidades para valorar sobre que activos se puede aplicar esta metodología en función de su ubicación en la matriz. Se va a realizar una pequeña descripción y explicación de las posibilidades y aquella escogida inicialmente por la compañía. Para ello se ha segmentado el área de equipos no críticos en diferentes zonas como se muestra en la Figura 42. Estas zonas permitirán explicar el razonamiento de cada decisión.

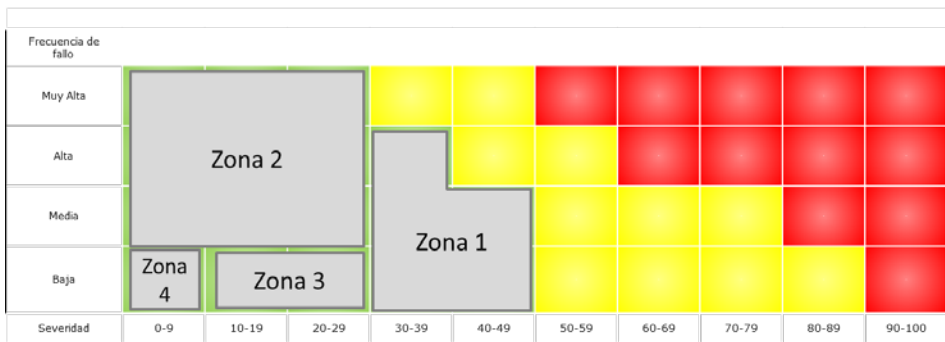


Figura 42; Zonas de análisis de ACRB en matriz de criticidad

Los equipos situados en la zona 1 de la matriz se descartan, dado que el cambio de estrategia lo que puede provocar es un movimiento en la vertical de la matriz de los equipos (un incremento en sus fallos). De este modo parece lógico discriminar aquellos equipos que aun siendo “no críticos” puedan pasar a semicríticos al aumentar el factor de frecuencia de fallo. Con una lógica similar, se descartan todos aquellos situados en la zona 2, pues aún sin correr el riesgo de pasar a ser semicríticos, ya se encuentran en un nivel de frecuencia de fallo que no debería ser asumible por la organización. De hecho, lo que habría que trabajar en esos equipos es alguna técnica en busca de disminuir la frecuencia de fallo, pero en cualquier caso no en una redefinición de estrategia que pueda aumentarla.

Así pues, la fuente de análisis del ACRB tiene como equipos potenciales las 3 primeras columnas de la fila inferior. Todos los equipos que han quedado encuadrados en esta zona cumplen el requisito de que tienen una frecuencia baja de fallo, una consecuencia baja de fallo, y no son susceptibles de convertirse en semicríticos con el cambio de estrategia. Sin embargo y debido a la implicación de las acciones a tomar (modificaciones de los planes de mantenimiento) y por ser este análisis un proyecto piloto dentro de Enagás, la compañía opta por limitar más aún el análisis y se centra sólo en los menos críticos de toda la matriz, eliminando el supuesto 3 del análisis. Una vez evolucione el proyecto y cuando se confirmen las bondades en los equipos analizados en esta fase es muy probable que el análisis se pueda aplicar en activos situados en otro lugar de la matriz. Incluso cabe la posibilidad, toda vez se pueda realizar un análisis simplificado de coste del ciclo de vida, que sea económicamente rentable encontrar un punto de equilibrio entre el preventivo y correctivo que permita una mayor frecuencia de fallo y por tanto que sea asumible por la organización que activos se sitúen en la fila inmediatamente superior de la matriz, con una frecuencia de fallo “media”.

En relación con en que momentos en los que ejecutar la metodología, hay que tener en cuenta que gran parte del análisis se basa en la situación de los activos en la matriz de criticidad en función de la frecuencia de fallo. Y como antes también se ha descrito, los resultados del cambio de una política de mantenimiento pueden tardar en producirse, y por tanto la implantación de una estrategia puede tardar años en manifestarse con resultados fiables y sostenidos. Lo que se pretende explicar es que no es un análisis que pueda realizarse cada año, pues si lo que se hace es esencialmente reducir la frecuencia de los mantenimientos preventivos, se debe dar tiempo a que esos nuevos planes de mantenimiento se implanten, y a que

un hipotético aumento de la frecuencia de fallo de los activos suceda.

En base a la experiencia obtenida en el proceso de implantación en la compañía, se entiende que un periodo inicial de 3 o 4 años entre los dos primeros ACRB es razonable, habiendo acumulado resultados fiables durante este tiempo. Posteriormente, y en función del grado de mejora necesario, dicha periodicidad puede variarse, siendo la mínima dos años (por el razonamiento de dar tiempo a los resultados a manifestarse), y no más de 5, donde sin duda dichos resultados deberían haberse manifestado.

La eficacia de esta metodología tiene como principal indicador el coste de mantenimiento del plan preventivo, referenciado esencialmente a las horas de trabajo asociadas a dichos planes. Como se ha propuesto en el RCM, debe ser complementado con la frecuencia de fallos, pues se debe controlar que la modificación de periodicidad de los planes no afecta de un modo significativo a la ubicación de los activos en la matriz, pero si los cambios son progresivos, es presumible que las modificaciones anuales de la matriz, también lo sean.

En el caso de Enagás, y sin entrar en el detalle de la metodología que como se comentaba previamente tiene un detalle muy significativo a la hora de su preparación y ejecución, el proceso se ha realizado 2 veces. En el 2016 se realizó la primera revisión de los planes de mantenimiento en base al ACRB, lográndose ahorros ligeramente superiores al 20% en horas de mantenimiento preventivo sin cambios significativos en la frecuencia de fallo de los equipos. Posteriormente en el 2020-2021 se ha realizado una segunda revisión lográndose una reducción de un 10% adicional. Como es lógico, cada vez es más difícil lograr reducciones, no tanto porque lo limite el posible incremento de correctivo en estos equipos, como que la base de análisis no es el total de los planes de preventivo. Muchos de ellos, y a pesar de recaer en activos no críticos según la matriz, tienen planes de mantenimiento legales asociados, normativas que cumplir, inspecciones que deben ser realizadas, mantenimientos obligatorios para estar cubiertos por garantías.

#### 3.1.2.4. Resumen de resultados de la línea de investigación

El objetivo de la presente línea era la integración de la gestión del riesgo como base de la estrategia de gestión de mantenimiento de manera efectiva. La inclusión en la estrategia incluye no sólo tener asignada una hora de ruta de metodologías a aplicar en función de la criticidad de cada activo, sino conocer y entender cuándo

deben aplicarse dichas metodologías y como valorar su impacto.

El análisis de criticidad ha demostrado en Enagás ser una herramienta útil a la hora de mostrar gráficamente la importancia relativa de cada uno de los equipos dentro de la estrategia de mantenimiento de la compañía. Visualmente es una herramienta muy intuitiva y fácilmente replicable en sistemas informáticos. De hecho, en Enagás está implantada en la herramienta de Business Intelligence de Microstrategy. La actualización de la matriz ya sea por cambio o adaptación de criterios, o por la simple actualización de valores, es sencilla ya que responde a los criterios de gestión de la compañía, por lo que una vez definida la base, se puede realizar de manera inmediata.

Las metodologías propuestas dentro del Modelo de Gestión de Mantenimiento para completar la estrategia intervienen directamente en los resultados de los dos principales indicadores definidos para el área; disponibilidad y coste. Y en ambos casos queda de manifiesto, gracias a la criticidad, que las metodologías se aplican de manera razonada y razonable en aquellos lugares donde tiene más impacto organizacional. Los indicadores de seguimiento de la metodología, relativos a incidencias, horas de trabajo, o coste de mantenimiento, son fácilmente definibles, medibles y permiten una relación directa y por tanto un análisis sencillo de los resultados obtenidos tras la implantación de la estrategia. El análisis técnico previo realizado durante el análisis de criticidad permite que las decisiones posteriores a tomar en la modificación de la gestión del mantenimiento, no tenga consecuencias inesperadas para la compañía, ya que nos centramos sólo en aquellos activos donde la organización quiere asumir el riesgo.

La implantación de esta estrategia de mantenimiento ha permitido a Enagás ser más sólido en las decisiones que toma a la hora de mejorar sus planes de mantenimiento, además de mejorar sus indicadores de incidencias, y de coste de mantenimiento de los planes preventivos, sin perjuicio de otros resultados. Culturalmente también ha permitido un salto de calidad cuantitativo al pasar de decisiones basadas en el conocimiento específico de los especialistas, a un conocimiento más corporativo basado en la información y datos contenidos en dichas metodologías, y almacenados en el GMAO de la compañía.

### 3.2. Bloque 2: Gestión del ciclo de vida operativo

Si bien el origen de la presente tesis fueron los objetivos del bloque 1, centrados la gestión del riesgo, los resultados de dicho bloque y la evolución de la compañía, hicieron crecer el alcance del estudio. El análisis realizado tras la implantación de la estrategia propuesta en el bloque 1 hizo ver que, si bien las metodologías daban resultados muy positivos en los resultados a nivel agregado, no permitían llegar al detalle necesario en aquellos activos que no eran críticos en función del riesgo, pero si era claves en la gestión de mantenimiento. Estos equipos son los que se denominan internamente como activos de “alta capitalización”. Son equipos con gran importancia en el proceso operativo y con un gran valor económico, tanto de adquisición, como de operación y mantenimiento. Son las grandes bombas y compresores, que no son activos críticos según la matriz, ya que están redundadas (no hay impacto en servicio) y muy monitorizadas (sin riesgo de impacto industrial), pero en contrapartida se llevan gran parte del presupuesto y de los quebraderos de cabeza de mantenimiento. Debido al impacto económico de posibles sustituciones de dichos equipos y de los grandes mantenimientos asociados, se concluye la importancia de tener un mayor conocimiento de cómo mejorar el ciclo de vida de dichos activos (46). Adicionalmente, facilitará la operabilidad de los activos permitiendo conocer el impacto relativo de las decisiones de O&M en los costes operativos, eliminando costes innecesarios (47).

Así pues, se generan dos nuevos retos que se incluyen dentro del análisis de la presente tesis y que se describen a continuación:

- Pregunta 3 (Q3); ¿Cómo se puede calcular de manera objetiva el impacto de los parámetros de operación y mantenimiento en el ciclo de vida de un activo?
  - En el resultado 3 (R3) se procederá a la adaptación de la metodología de índice de salud de activos a una serie de equipos de alta capitalización de la industria de gas natural. Se mostrará cómo se ha definido y como se calcula en la organización a través de las herramientas informáticas.
- Pregunta 4 (Q4); ¿Cómo puede impactar el índice de salud de activos en el Análisis de Coste del Ciclo de Vida?
  - En el resultado 4 (R4) se procederá a presentar una propuesta de

uso del valor de índice de salud de activos para la estimación de costes de mantenimiento dentro del cálculo del ciclo de vida de los activos, así como un ejemplo de aplicación y el análisis de su impacto en decisiones de ejecución de grandes mantenimientos.

De manera análoga a la Tabla 1 mostrada en el bloque 1, en la Tabla 23 se describen las relaciones entre las publicaciones realizadas durante la tesis y los resultados obtenidos.

Resultados del bloque II	Paper	Capítulos
R3 Definición de Índice de Salud de Activos en activos de alta capitalización en la industria de gas natural	Paper 3	Capítulo 3
R4 Integración del Índice de salud de activos dentro del cálculo de coste del ciclo de vida de un activo	Paper 2 Paper 3	

Tabla 23; Reacción de resultados de bloque II con publicaciones

### 3.2.1. Definición de Índice de Salud de Activos en activos de alta capitalización en la industria de gas natural

#### 3.2.1.1. Consideraciones previas. Marco de aplicación

Dentro de la gestión de activos, las metodologías basadas en conocimiento experto, vistas desde un punto de vista de estrategia, son las que de un modo más fiable permiten conectar el conocimiento técnico con los criterios de decisión. Toda decisión, especialmente las que tienen un alto impacto económica tienen que estar bien sustentadas técnicamente. Sin embargo, cuando mayor es el detalle técnico, más difícil es transmitir la justificación de dicha inversión, ya que muchas veces dicho lenguaje no es comprensible para los gestores responsables de tomar dichas

decisiones. Históricamente, este tipo de decisiones se han basado en el conocimiento experto de los especialistas, lo que delegaba parte de la estrategia en una opinión que era difícil conocer hasta que punto era subjetiva. Así pues se quiere trabajar en una metodología que permita objetivar de manera consensuada los criterios técnicos que ayuden a valorar el estado de unos activos frente a otros (48). Este concepto subjetivo se definirá como “salud”, ya que a través de una serie de parámetros tratará de simplificar su estado en un único concepto. En función del grado de madurez de la metodología y los perfiles profesionales que se van a enfrentar a este proceso, será un proceso más integrable en la empresa (49).

Si bien no es alcance del presente estudio centrarse el concepto como el e-maintenance, el sistema que se pretende diseñar podría encuadrarse dentro de lo que define el marco teórico (50), pues van a entrar en juego la monitorización, el conocimiento experto, y sistemas inteligentes, en este caso la propia metodología. Como se verá tras el desarrollo, el objetivo final es terminar con un producto que pasada la fase de diseño, se alimente expresamente de datos para construir un sistema inteligente de soporte al mantenimiento (51).

Tomando como referencia el MGM, la aplicación de técnicas del cálculo de índices de salud de activos forma parte de la Fase 7 del mismo. Las técnicas existentes para el cálculo de índices de salud son herramientas que miden la condición de un activo de una instalación y lo próximo que se encuentra al final de su vida útil. El índice de salud se traduce en un indicador, que tiene como base la gestión del conocimiento experto del personal de las instalaciones. Con este indicador seremos capaces de cuantificar opiniones, comparar activos similares y valorar el impacto de O&M (Operación y Mantenimiento) en el ciclo de vida.

Es importante indicar, que el índice de salud refleja la degradación relativa a largo plazo, y no se centra en el análisis de los modos de fallo o de su mantenimiento correctivo. La diferencia de ambos conceptos debe quedar clara (52):

- Fallo funcional; están asociados a los modos de fallo y afectan a la operación y fiabilidad del activo durante su vida útil, pero no afectan a dicha vida. Los fallos son detectados y corregidos. Se corresponden con la rutina habitual de inspección, detección y corrección para la operación del equipo (53).
- Degradamiento; es un envejecimiento del activo que no deriva en un fallo incipiente, es más difícil de detectar con rutinas de inspección y

afectan al ciclo de vida del activo.

En cualquier caso, hay modelos de ISA que se usan en el campo de la prognosis y la monitorización de activos (54–57).

El ISA, representa un método sencillo y práctico para cuantificar de manera numérica el estado operativo de un activo concreto. La mayoría de los grandes activos o activos de alta capitalización, están compuestos de varios subsistemas y cada subsistema se caracteriza por múltiples modos de fallo y de degradación o envejecimiento. De manera general, se puede entender que un activo ha alcanzado el final de su vida útil, cuando varios subsistemas han alcanzado un estado de deterioro que evita que el equipo continúe ofreciendo el servicio requerido por el negocio (58). Por esta razón, el índice de salud se basa en los resultados del análisis de datos operacionales, inspecciones del activo y análisis del mantenimiento, traduciendo todo a un indicador cuantitativo. Para poder desarrollar el índice de salud es importante recopilar determinada información de los activos a los que queremos aplicar la metodología, y tener claro cuáles deben ser los modificadores de fiabilidad y operacionales que afectan a la salud de éste. Estos conceptos serán desarrollados en los apartados posteriores. Por tanto, los principales objetivos que se persiguen mediante la aplicación de esta metodología son (59–61):

- Comparar la salud de activos del mismo tipo, en distintas ubicaciones.
- Valorar la probabilidad de fallo de un activo en función del cálculo de su ISA
- Optimizar los planes de operación & mantenimiento
- Priorizar los de grandes mantenimientos (overhauls), así como las posibles sustituciones por obsolescencia o mejora tecnológica (62)
- Maximizar el ciclo de vida de los activos de alta capitalización (63)
- Minimizar el riesgo en los periodos cercanos al fin de la vida útil.

Se debe tener en cuenta que el índice de salud no es una herramienta de monitorización, sino una recopilación de toda la información necesaria de los activos para poder establecer una tendencia y un diagnóstico.

De la misma manera, y a pesar de los numerosos beneficios que se pueden observar, existen también numerosos retos a tener en cuenta para una implantación efectiva del concepto de ISA dentro de las estrategias de gestión de mantenimiento.



Estudios de referencia (64) remarcan algunos factores a tener en cuenta antes de desarrollar la metodología:

- La toma de datos tiene un coste. Automatizar un dato, evita los procesos manuales, pero requiere de una inversión inicial no desdeñable.
- Cuando más distribuidos están los activos, más difícil es acceder a la información de éstos.
- Para una empresa sin experiencia en el uso de este tipo de datos, es difícil definir todos los parámetros asociados a esta recogida.
- Es difícil calcular el retorno de la inversión para valorar la bondad de la metodología.
- La falta de histórico puede lastrar los beneficios potenciales, que en muchos casos se basan en la experiencia y comparativa con datos previos.

### 3.2.1.2. Explicación metodología de Salud de Activos

Para alcanzar los objetivos perseguidos con el índice de salud se desarrolla una metodología propia cuya base para su elaboración ha sido el documento del Grupo de Trabajo sobre Metodología de Índices de Activos de Red de Transporte de electricidad del Reino Unido (65). En dicho documento, se establece un marco de referencia asumido por todos los operadores de redes de distribución en Reino Unido, donde se incluyen una serie de definiciones, principios y metodologías de cálculo utilizado para el reporte regulatorio del Riesgo de Activos. Existen otros países que también han tomado este concepto como referencia para justificar ante organismos similares reemplazos de activos o costes de mantenimiento extraordinarios (66,67).

Para el cálculo del índice, la metodología necesita un gran número de datos de entrada para alimentar los modelos de cálculo (68). A continuación, se citan a modo de ejemplo los principales:

- La identificación del activo analizado. Se incluyen es esta identificación la categoría del equipo en base a su función principal, la edad actual en base al histórico operativo, la vida esperada dada por el fabricante, el modelo del equipo e incluso su localización específica dentro de la instalación (69).
- Se requiere también disponer de un histórico de datos de operación

registrados en un periodo de tiempo concreto. Cuanto mayor sea el histórico, mayor información obtendremos de los datos. Se deben agregar de manera que permitan conocer el tiempo en que el equipo ha estado sometido a consideraciones especiales como arranques, operación fuera del rango óptimo...

- Por último, se necesitan datos relativos a la condición del equipo. Son resultados de los análisis de mantenimiento (vibraciones, termografías), así como la lectura de otras variables físicas como la temperatura o la presión, que pueden afectar al ciclo de vida del equipo. La recogida de toda esta información es capital para la correcta valoración y análisis del sistema monitorizado (70).

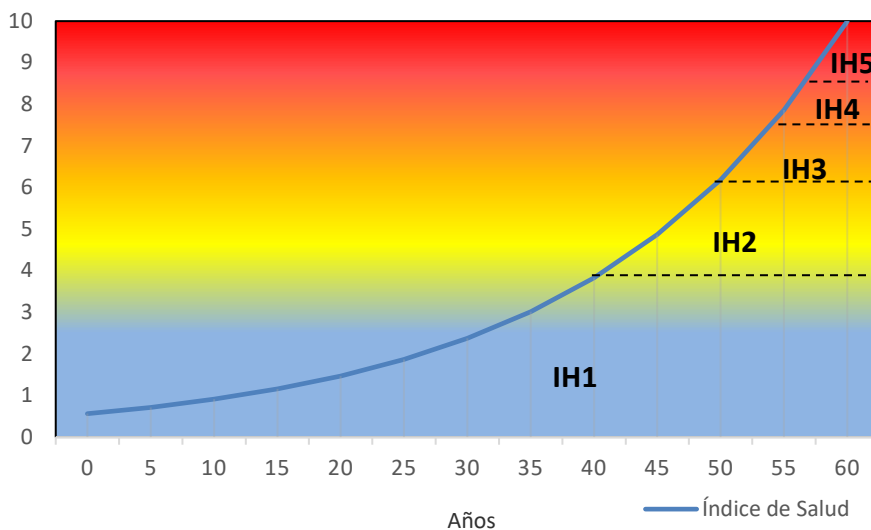


Figura 43; Rangos de Índice de Salud de Activos

Como ya se ha comentado, la Salud (H) de un activo es un valor que hace referencia a la condición de éste, y manifiesta su situación en relación a su vida útil. El índice de salud (HI), es un número adimensional que refleja el estado en el que se encuentra el activo. Se definen los límites con los valores de 0,5 cuando el equipo

responde como si fuera un equipo nuevo, y de 10, cuando el equipo se encuentra cercano al final de su vida útil. El índice de salud parte de la premisa de un comportamiento exponencial de la salud frente a la edad del mismo. En la Figura 43 se puede observar gráficamente la representación gráfica de los diferentes tramos en los que se divide el ISA.

El tramo IH1 (Index Health 1) comprende la zona situada entre los valores  $H=0.5$  y  $H=4$ . En esta zona, el comportamiento del activo responde a lo que se espera de un equipo nuevo. El tramo IH2 comprende la zona situada entre los valores  $H=4$  y  $H=6$ . Esta zona se corresponde con periodo en el que el activo empieza a funcionar con los primeros síntomas de desgaste. Es justo en el valor de  $H=5.5$ , valor superior límite de este tramo, donde se hace coincidir el fin de vida esperada "normal" del activo. Inmediatamente después, se definen 3 nuevos tramos: IH3, IH4 e IH5, fijando los límites cuando el índice  $H$  alcanza los valores de 6, 7 y 8 respectivamente. Una vez sobrepasado el valor de  $H=8$ , la metodología define que el equipo se encuentra al final de su ciclo de vida útil

Para la aplicación de la metodología, se realizan 5 pasos consecutivos (71) que se van a recorrer con más detalle, tanto teóricamente, como con el ejemplo práctico descrito en la tesis. A continuación, se describen brevemente los 5 pasos, y se presentan de manera esquemática en la Figura 44. Para una descripción precisa de la metodología y la formulación existe un ejemplo de aplicación en la siguiente referencia (72).

- *Paso 1; Vida normal.* Se parte de una vida normal del activo, que es el ciclo de vida teórico proporcionado por el fabricante, o bien el que ya se puede conocer si se tiene una base de activos histórica suficiente. Esta vida normal viene definida en función de la categoría y sub-categoría del equipo.
- *Paso 2; Vida estimada.* Sobre la vida normal, se realizan correcciones de acuerdo a los factores de carga y emplazamiento. Tanto la ubicación concreta del activo, como la carga demandada en función de su situación dentro del proceso de la instalación van a condicionar la información inicial, y a partir de estos valores se calcula la llamada vida estimada.
- *Paso 3; Tasa de envejecimiento.* Una vez obtenida la vida estimada, se hace coincidir, tal y como propone la metodología, el fin de la

vida estimada en operación normal con un valor de  $H=5,5$ . De esta manera ya se consigue la tasa de envejecimiento, que será la variable que permitirá el posterior cálculo del índice de salud.

- *Paso 4; Índice de Salud Previsto.* Una vez calculada la tasa de envejecimiento, se relaciona de manera directa, a través de la formulación del ISA, el valor de salud  $H$  con las horas de operación del equipo. Así pues, para cada momento concreto de la vida, se puede calcular el índice de salud previsto.
- *Paso 5; Índice de Salud Actual.* Sobre el cálculo teórico previsto, existen parámetros que pueden condicionar el cálculo final. Los modificadores de fiabilidad y de salud, van a actuar sobre el cálculo para obtener el índice de salud actual. Si bien los pasos previos se definen una primera vez y ya quedan fijados para todo el cálculo, los modificadores que se tienen en cuenta para este último paso actúan sobre la salud en tiempo real y por tanto son los que alimentan el modelo de manera dinámica a lo largo de todo el ciclo de vida del activo.

Parte del estudio relacionado con el ISA que se presenta, y con el objetivo de proporcionar al proceso de modelado un enfoque más científico y robusto, se han utilizado en su fase teórica modelos de simulación en tiempo real. Este proceso ha permitido formular las expresiones matemáticas de una manera mucho más rigurosa. Además, los modelos utilizados permiten la optimización multivariable, lo que resulta esencial para una correcta calibración y validación del modelo teórico. Como se verá a continuación, y para el desarrollo de la presente tesis, la exposición se centra en la parte más práctica de adaptación de la metodología al sector y su aplicación industrial. Por eso se hace referencia al paper incluido en la presentación por compendio para analizar todo el desarrollo. Simplemente hay que destacar que la metodología escogida para la simulación ha sido la de Sistemas Dinámicos. De entre muchos enfoques disponibles (73) se ha escogido porque permite una representación gráfica del modelo y sus variables muy visual (74). Otros usos novedosos de sistemas dinámicos integrados con otras metodologías se pueden encontrar en la bibliografía (75,76).

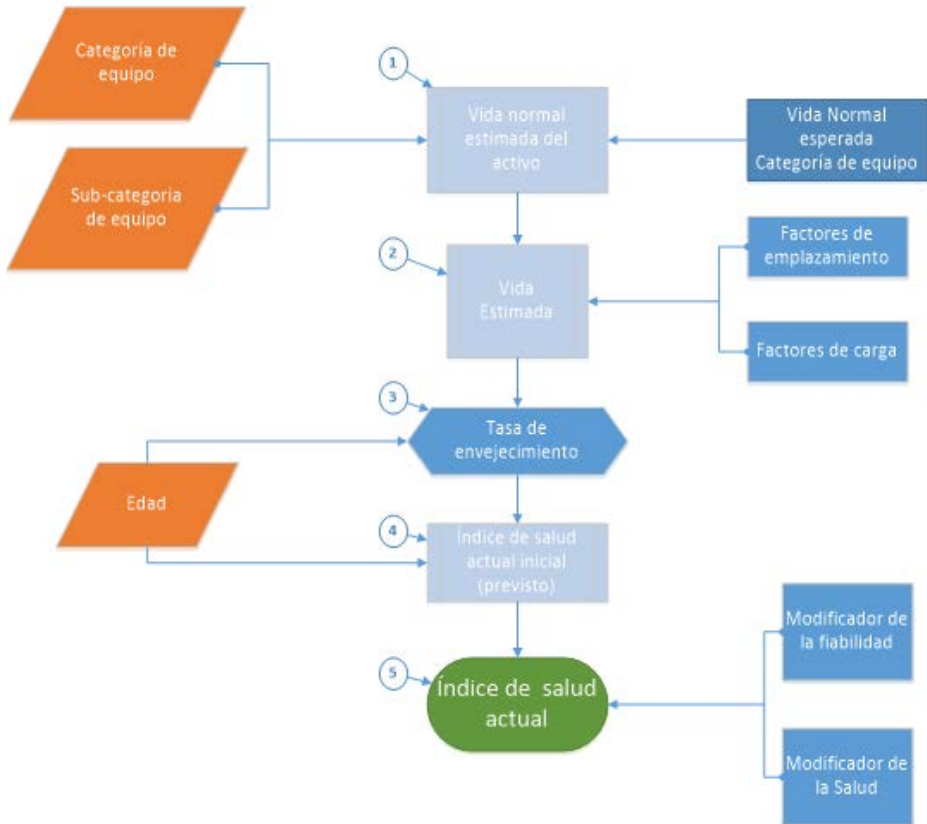


Figura 44; Metodología de cálculo de Índice de Salud de Activos

### 3.2.1.3. Adaptación de la metodología al sector del gas natural

A continuación, se va a ir detallando la aplicación de la metodología, a la vez que se va explicando cuales han sido las adaptaciones para incluirlo dentro de los activos de gas natural.

#### Paso 1; Vida normal del activo

El objetivo de este primer paso es obtener el dato de partida a partir del cual se irán haciendo las diferentes interpretaciones y conclusiones. Es el marco de referencia en el cual nos vamos a empezar a mover para los diferentes cálculos. Así pues, el

primer dato que necesitamos obtener es la vida normal del activo. Este dato indica cual es el ciclo de vida teórico proporcionado por el fabricante hasta el cual dicho activo puede operar en condiciones normales. En función de cómo se quiera calcular el índice de salud, puede ser el periodo total de su vida, o bien lo más habitual, el periodo operativo hasta los grandes mantenimientos u “overhauls”, que suele ser una práctica muy habitual en los activos de alta capitalización. Los conceptos que van a definir la vida esperada van a ser:

- Categoría del equipo
- Subcategoría del equipo

En cuanto a la definición de la categoría y sub-categoría, el alcance de esta metodología, abarca identificar qué activos del negocio van a ser objeto de estudio. En Enagás, el procedimiento se ha desarrollado para los siguientes tipos de activos:

- Plantas de regasificación de GNL:
  - Bombas criogénicas.
    - Primarias.
    - Secundarias.
  - Compresores de Boil-off.
- Estaciones de compresión:
  - Turbocompresores.
  - Tren turbocompresor
- Almacenamiento de gas subterráneo.
  - Compresores de gas a pozo.
    - Tren turbocompresor
    - Compresor de gas a pozo.

Así pues, y una vez identificados a qué activos se va a realizar el estudio, abordamos como obtener la vida normal del activo. Como se ha comentado previamente, puede venir dado por el fabricante, o si la empresa tiene suficiente experiencia, puede tener una estimación propia. En el sector del gas, en muchas ocasiones, el fabricante no proporciona información sobre la vida normal estimada, por lo que para aplicar la metodología es posible sustituir este concepto por otro. La alternativa más sencilla y práctica es la estimación del periodo de tiempo

recomendado para la realización del *overhaul* o mantenimiento mayor de un equipo. Estas actividades están orientadas al reemplazo de los elementos de desgaste de un activo, permitiendo, tras dicha intervención, estimar que el activo debe funcionar con la misma fiabilidad que si fuera nuevo. Así pues, se pasa de considerar el ciclo de vida como el periodo de tiempo entre la puesta en marcha y el desmontaje a considerarlo como el periodo entre mantenimientos mayores.

### Paso 2; Vida estimada

Sin embargo, el concepto de vida normal obtenido en el paso 1, que podríamos considerar teórico, se ve inmediatamente condicionado en el momento que es instalado. La ubicación física del activo, así como su situación en el proceso, va a condicionar dicha vida teórica. La misma bomba, instalada en diferentes puntos de la instalación industrial, puede tener una vida estimada muy diferente. Es el impacto que provoca dicha ubicación en su vida lo que analizaremos para calcular esta nueva vida estimada. Los conceptos que van a caracterizar este ajuste son los:

- Factores de emplazamiento
- Factores de carga

Estos factores van a depender de la industria específica y el activo concreto (77). Como comentario general, hay que destacar que los factores, van a ser valores numéricos que se van a ir incluyendo en la formación para dar un peso relativo dentro del impacto que dichos factores tendrán en la salud. De esta manera, cuando un factor no tenga impacto en el ciclo de vida del activo, se le asignara el valor "1", de manera que, al integrarlo en la formulación, no modifica la vida esperada. Si se quiere cuantificar un impacto negativo (que acorte el ciclo de vida), se irá incrementando el valor proporcionalmente al impacto que queramos representar (1.1, 1.2, 1.3...). Si se diese el caso, también podría estimarse que algún modificador puede aumentar el periodo de vida estimado, en cuyo caso, se realizaría a la inversa (0.9, 0.8...)

#### *Factores de emplazamiento*

Los factores de emplazamiento son aquellos que pueden condicionar el ciclo de vida inicial estimado de un activo en función de la ubicación física donde se haya instalado el equipo en la instalación, y por la zona geográfica donde se encuentre. Son factores invariables en el tiempo y que se pueden valorar desde el mismo momento de la puesta en marcha del equipo, como por ejemplo la exposición

atmosferas corrosiva o la temperatura ambiental media. A continuación, se muestran algunos de los considerados en la compañía, así como los valores propuestos a modo ilustrativo:

- *La distancia a la costa.* Este factor se tiene en consideración al contemplar la posibilidad de que un activo sufra daños por el ambiente salino más corrosivo derivado de estar cerca de la costa. Su ponderación se muestra en la Tabla 24.

Distancia	Escala
0 Km – 1 Km	1.2
1 Km – 5 Km	1.15
5 Km – 10 Km	1.1
10 Km – 20 Km	1.05
Superior a 20 Km	1

Tabla 24; Ponderación factor de emplazamiento distancia a la costa

- *Promedio de la temperatura exterior.* Este factor se tiene en consideración al contemplar el impacto que puede causar la temperatura media a la que opera un determinado equipo. Esta variable puede afectar al rendimiento del activo y a la fiabilidad del mismo al estar en relación directa con algunos de los modos de fallo. Su ponderación se muestra en la Tabla 25.

Temperatura	Escala
0 °C – 10 °C	1
10 °C – 20 °C	1.1
20 °C – 30 °C	1.2
> 30 °C	1.3

Tabla 25; Ponderación factor de temperatura exterior

- *Exposición a agentes externos corrosivos:* Este factor se tiene en consideración al contemplar la posibilidad de que la instalación se sitúe en el entorno de otras industrias que puedan tener emisión de polvo en suspensión u otros



agentes corrosivos, y que por tanto puedan tener impacto en el deterioro de los equipos o sus subcomponentes a largo plazo. Sus ponderaciones se muestran en las Tablas 26 y 27 respectivamente.

Planta de GNL	Escala
Huelva	1
Cartagena	1.1
El Musel	1.1
Barcelona	1.2

Tabla 26; Ponderación exposición agentes externos (atmósfera explosiva)

Planta de GNL	Escala
Huelva	1
Cartagena	1.1
El Musel	1.1
Barcelona	1.2

Tabla 27; Ponderación exposición agentes externos (polvo en suspensión)

Debe tenerse en cuenta que todo lo descrito está condicionado a la protección que tenga el activo. Hay ocasiones en las que, por la criticidad del activo, o por el propio diseño del proceso, los equipos se encuentran en algún habitáculo o línea que lo proteja de muchos o todos estos factores. Si la ubicación física del activo es exterior, y por tanto no está protegido, el cálculo del factor combinado de localización se calcula siguiendo la ecuación 2:

$$F_E = \max(F_{DC}, F_A, F_T, F_{AT}, F_{PS}) \quad (2)$$

Siendo la notación utilizada:

- $F_E$ : Factor de emplazamiento combinado.
- $F_{DC}$ : Factor distancia a la costa.
- $F_A$ : Factor altitud sobre el nivel del mar
- $F_T$ : Factor promedio anual de la temperatura exterior.
- $F_{AT}$ : Factor de exposición a atmósfera corrosiva.
- $F_{PS}$ : Factor de exposición a polvo en suspensión.

Para situaciones en la que la ubicación del activo es interior, y por tanto el equipo está protegido de los factores de emplazamiento, se le asignará el valor 1. Es la forma de cuantificar a través de la metodología que, en este caso, estos agentes externos no tienen impacto en el cálculo inicial de la vida estimada del activo.

#### *Factor de carga*

El factor de carga de cada equipo viene definido por la relación entre la carga del equipo en su punto de funcionamiento esperado (o punto de garantía) por el hecho de encontrarse en una ubicación técnica de la instalación, y el punto de máxima carga posible al que podría someterse el equipo. El factor de carga es, por tanto, consecuencia de las condiciones de funcionamiento para las que se ha diseñado la instalación y tomará valores en el intervalo [0,1].

Normalmente, estos datos se obtienen de la puesta en marcha y entrega de los equipos por parte del fabricante, quedando registrado en las especificaciones técnicas del equipo. De forma general se usa la ecuación 3:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Carga en condiciones normales o en el punto de garantía}}{\text{Carga máxima admisible}} \quad (3)$$

Se tiene que la Vida Estimada del activo es el cociente que resulta de dividir la vida normal estimada obtenida en el paso 1, entre el producto de los factores de emplazamiento y de carga, como se muestra en la ecuación 4:

$$\text{Vida estimada} = \frac{\text{Vida normal estimada}}{F_E \times F_C} \quad (4)$$

Mediante este cálculo, la vida normal estimada que viene definida por la categoría y subcategoría del equipo, puede verse modificada. Se va a asumir para el ejemplo de la tesis que el equipo está fijo en una ubicación técnica concreta durante todo el ciclo de vida. Hay ocasiones en las que determinados activos pueden variar su localización a lo largo de su ciclo operativo, y esto tiene impacto directo en el cálculo. Existen soluciones que permiten la trazabilidad de los modificadores en función de si estos se realizan sobre el emplazamiento, o sobre el equipo que lo ocupa en sí. Sin embargo, dado que no tiene impacto real en la metodología, y es más una problemática de orden y trazabilidad de la información, se va a suponer un caso estándar con relación univoca entre activo y localización.

### Paso 3; Tasa de envejecimiento

Una de las premisas de la metodología escogida es el comportamiento de tipo exponencia que define el envejecimiento que sufre un activo a lo largo de su vida útil. En la metodología, el parámetro que expresa matemáticamente este comportamiento se denomina tasa de envejecimiento. Esta variable es la que recoge los distintos condicionantes que el activo sufre a lo largo de su ciclo de vida y por tanto impactan sobre la fiabilidad y probabilidad de fallo esperada.

La tasa de envejecimiento ( $\beta$ ) se define como el logaritmo natural del cociente entre la salud de un activo nuevo y la salud que tendría cuando alcanza el final de la vida estimada ( $H=5,5$  definido en el modelo). El cálculo se muestra en la ecuación 5:

$$\beta = \frac{\ln \frac{HI \text{ vida estimada}}{HI \text{ nuevo}}}{Vida \text{ estimada}} \quad (5)$$

Siendo la notación utilizada:

- $\beta$ : Tasa de envejecimiento del activo
- $HI \text{ nuevo} = 0,5$  Valor de salud asignada a un activo nuevo
- $HI \text{ vida estimada} = 5,5$  Valor de salud asignada a un equipo al final de su vida estimada
- $Vida \text{ estimada}$ : Tiempo calculado en el paso 2

#### Paso 4; Índice de Salud Actual Inicial (previsto)

El índice de salud de activos se representa como un número adimensional comprendido entre los valores de 0,5 y 10. La evolución de este índice viene caracterizada por la variable calculada previamente (tasa de envejecimiento), que define el valor del ISA respecto de la edad operativa del activo (generalmente calculada en horas de operación).

Así pues, para calcular del índice de salud actual inicial (**HI<sub>i</sub>**) de un equipo, se utilizará la ecuación 6. La tasa de envejecimiento  $\beta$  se ha calculado previamente en el paso 3, y la edad queda representado por las unidades de tiempo escogidas para el cálculo (años, horas...).

$$HI_i(\text{edad}) = HI_{\text{nuevo}} \times e^{\beta \times \text{edad}} \quad (6)$$

La Figura 45 muestra un ejemplo del cálculo de un índice de salud actual inicial. Como se puede observar, en este caso el cálculo de edad se realiza en años para una vida estimada de 50.

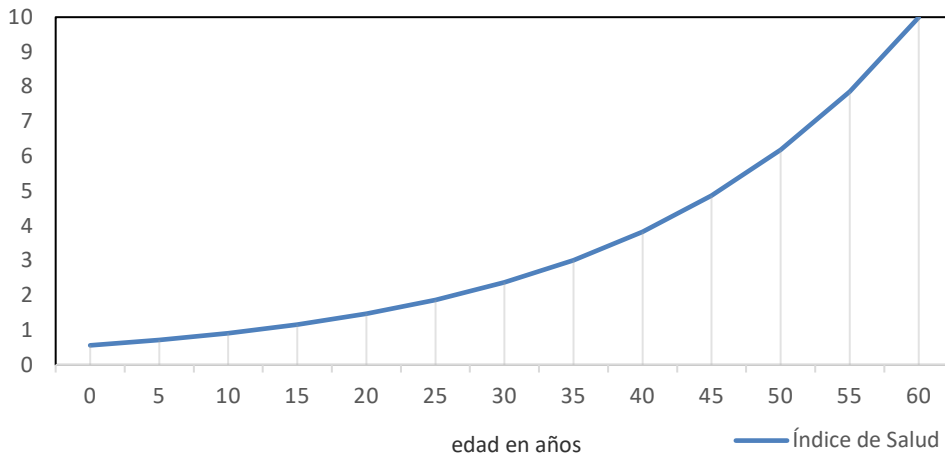


Figura 45; Índice de Salud teórico

### Paso 5; Índice de Salud Actual

El último paso de la metodología consiste en el cálculo del índice de salud actual (**HI**). El valor del ISA resulta de calcular el efecto que los modificadores de salud y fiabilidad tienen en el cálculo de índice de salud previsto calculado en el paso 4.

En un paso inicial, se realiza un pequeño ajuste calculando el denominador índice de salud inicial modificado (HIMi) en función de la carga a la que se este funcionando para la edad en la que se realiza el cálculo (MC (edad)) de acuerdo a la ecuación 7.

$$HIM_i(edad) = HI_{nuevo} \times e^{\left(\frac{\beta \times edad}{MC(edad)}\right)} \quad (7)$$

Se podría considerar el modificador de carga para la edad actual como un modificador de salud y por tanto incluirlo en los cálculos de éste. Sin embargo, se considerará previamente, ya que es frecuente que la carga asumida por estos activos a lo largo de su ciclo de vida sea significativamente diferente (generalmente inferior) a la prevista por el diseño y la ubicación física del mismo.

Introduciendo el parámetro HIMi, se justifica la devaluación o deterioro actual y permite compararlo con el que se había previsto para la ubicación concreta.

Posteriormente, se puede ya calcular el ISA, que vendrá determinado por el índice de salud previsto y los condicionantes de operación y fiabilidad en el momento que se está evaluando, de acuerdo a la ecuación 8.

$$HI(edad) = HIM_i(edad) \times MS(edad) \times MF(edad) \quad (8)$$

Siendo la notación utilizada:

- HIMi: Es el índice de salud actual inicial modificado.
- MS: Es el Modificador de la salud del activo (condición y operación).
- MF: Es el Modificador de la Fiabilidad del activo.

### *Evaluación del modificador de Salud*

Para el cálculo del *modificador de salud (MS)*, se deben tener en consideración las variables físicas que se pueden medir y cuantificar para cada activo concreto. Son parámetros que condicionan la salud actual y futura del activo, y por tanto se deben medir e incluir en el cálculo.

Son muchos los factores físicos que pueden influir en la salud, pero se definirán sólo aquellos cuyo impacto sea suficiente para ser tenido en consideración, evitando así que el modelo sea innecesariamente complejo. Generalmente van a ser variables físicas que influyen directamente en la operativa del activo, como la presión, la temperatura, el caudal vehiculado...). Al igual que el resto de modificadores, se van a tomar valores que se sitúen entre 1 y 1,5. Con la misma lógica que los factores de localización, se definirán valores superiores (cercanos a 1,5) a aquellos modificadores que influyan con mayor peso en el cálculo de la salud, y valores más cercanos a 1, a aquellos cuya influencia sea más limitada.

### *Evaluación del modificador de Fiabilidad*

Los *modificadores de la fiabilidad (MF)*, tienen en cuenta aspectos con impacto directo en la fiabilidad y que pueden variar de manera significativa entre activos categorizados de la misma manera. En este caso, al considerar un efecto más moderado, los factores estarán comprendidos entre 1 y 1,2. La ponderación aplicada se basa en la experiencia del fabricante o del usuario, e incluye conceptos como el número de grandes mantenimientos realizados sobre el activo, tiempos elevados de inactividad o número de arranques entre otros.

La expresión utilizada para el cálculo del valor del modificador de salud (MS) es la 9 y con la ecuación 10 se obtendrá el modificador de fiabilidad (MF):

$$MS(edad) = \prod_{j=1}^{j=n} MS_j(edad) \quad (9)$$

Siendo la notación utilizada:

- $j=1 \dots n$ : Es un índice utilizado para distintos modificadores de salud
- $MS_j(edad)$ : Es el modificador de salud en tiempo edad.

$$MF(edad) = \prod_{k=1}^{k=m} MF_k(edad) \quad (10)$$

Siendo la notación utilizada:

- $k=1\dots m$ : Es el índice que se utilizará para definir los diferentes factores de fiabilidad
- $MF_i(edad)$ : Es el modificador de fiabilidad utilizado para una edad concreta

A continuación, se muestra un ejemplo gráfico del impacto que pueden tener los modificadores en el cálculo de la salud en la figura 46. En este caso se muestra la comparación del HII frente al HI en un activo con un ciclo de vida estimado en 50 años. Se observa que en el supuesto que refleja, el activo tiene una mejor salud calculada en el periodo entre los años 15 y 35. Esta hipótesis puede ser válida, entendiendo que, si el equipo opera en condiciones más favorables que las de diseño, su ciclo de vida puede ser mayor. Entre los años 35 y 40 ambos valores coinciden. Es a partir de ese momento cuando los modificadores tienen un impacto negativo y la salud calculada va a ser siempre superior a la inicial, y por tanto su ciclo de vida va a ser inferior a 50 años. En las simulaciones dinámicas desarrolladas para el modelo teórico las formulaciones pueden diferir (78), si bien se asumen simplificaciones para tener una mayor simplicidad funcional.

Es un ejemplo ilustrativo para mostrar el efecto, pero en el siguiente apartado se va a mostrar un ejemplo concreto detallado con los cálculos reales paso a paso, para poder ver con mayor cercanía el impacto de cada uno de los pasos en los cálculos de la salud del activo.

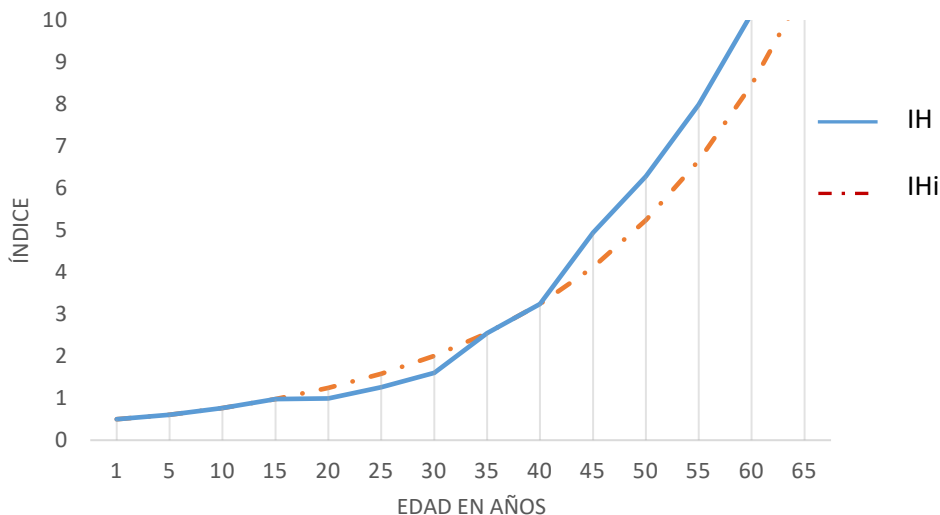


Figura 46; Comparativa Salud Teórica y Salud Calculada

### 3.2.1.4. Ejemplo de aplicación a una bomba centrífuga criogénica

Al igual que se ha realizado en el bloque I al aplicar la metodología de análisis de criticidad, se pretende a continuación describir un pequeño ejemplo de aplicación a modo ilustrativo. Si bien existen más condicionantes en una implantación real, se entiende que la simplificación expuesta recoge los aspectos críticos más relevantes a tener en cuenta en la adaptación de la metodología.

Para poder seguir el racional teórico, se ha desarrollado el ejemplo siguiendo los mismos pasos expuestos previamente en la explicación de la metodología.

#### Paso 1; Vida Normal Estimada

Para la vida normal estimada se debe conocer:

- *Categoría y subcategoría del equipo:* en este caso sería: bombas centrífugas. Si bien esta sería la descripción siguiendo la taxonomía más estándar, es reseñable que en este caso el ejemplo se aplica en una bomba criogénica y por tanto este aspecto define en si mismo parte del ciclo de vida.



- *Vida normal*: se consultará al fabricante cuál es la vida normal estimada del activo. Si el fabricante no da este dato se puede considerar el tiempo hasta el overhaul. Como se ha explicado en el apartado teórico, este dato puede llegar a modificarse, una vez se vaya conociendo el periodo real estimado hasta el fallo, y por tanto se pueda ajustar mejor el periodo de grandes intervenciones. Lo habitual es que el fabricante de unos tiempos recomendados de grandes mantenimientos significativamente inferiores al tiempo real estimado hasta el fallo. Por este motivo y dependiendo del conocimiento real de dicho periodo, es habitual partir del dato recomendado por el fabricante, e ir aumentando gradualmente este valor. En Enagás se propone tomar como valor de vida estimada, el mayor número de horas que haya tenido un activo de la misma categoría (bomba centrífuga criogénica) en operación. En este ejemplo, partiremos de la vida normal estimada por el fabricante hasta el overhaul, que es de 11.000 horas.

#### Paso 2; Vida Estimada

En este paso, se adapta la vida esperada en función de la ubicación física donde se instale el activo. Se recuerda que dicho impacto va a venir de los hipotéticos agentes físicos externos, y de la configuración de la planta donde se instala, que le va a exigir un punto de funcionamiento más o menos exigente. A continuación, se estiman dichos valores:

- *Factores de emplazamiento*; Como la bomba se encuentra en el interior de un depósito el factor de emplazamiento es igual a 1 ( $FE=1$ ).
- *Factores de carga*; En el caso de una bomba centrífuga, el factor de carga se va a calcular como la relación entre la potencia de la bomba en el punto de garantía y potencia nominal de la bomba como se muestra en las ecuaciones 11 y 12. Estos datos pueden obtenerse de las especificaciones del fabricante de la bomba. Por ejemplo,

$$Factor\ de\ carga = \frac{Potencia\ en\ el\ punto\ de\ garantía\ (Kw)}{Potencia\ nominal\ (Kw)} \quad (11)$$

$$Factor\ de\ carga = \frac{64\ Kw}{97\ Kw} = 0.66 \quad (12)$$

Con estos datos ya se podría aplicar la fórmula para calcular la Vida Estimada de la bomba centrífuga con la ecuación 13, siendo el cociente resultando de dividir la vida normal estimada que se ha obtenido en el paso 1, entre el producto de los factores de emplazamiento y de carga.

$$Vida\ estimada = \frac{Vida\ normal\ estimada}{F_E \times F_C} \quad (13)$$

Aplicando la fórmula se tendría un valor de vida estimada de 16.667 h

Paso 3; Tasa de envejecimiento

Para el cálculo de la tasa de envejecimiento ( $\beta$ ) se aplica la ecuación 14:

$$\beta = \frac{\ln \frac{HI\ vida\ estimada}{HI\ nuevo}}{Vida\ estimada} \quad (14)$$

Siendo la notación utilizada:

- $\beta$ : Tasa de envejecimiento del activo
- HI nuevo = 0,5 Valor de salud asignada a un activo nuevo
- HI vida estimada = 5,5 Valor de salud asignada a un equipo al final de su vida estimada
- Vida estimada: Tiempo calculado en el paso 2

El resultado de aplicar la fórmula nos da un valor de tasa de envejecimiento de 0,00014

Paso 4; Índice de Salud Inicial (previsto)

La ecuación 15 se aplicará para el cálculo del índice de salud actual inicial (HI<sub>i</sub>):

$$HI_i(edad) = HI_{nuevo} \times e^{\beta \times edad} \quad (15)$$

Siendo la notación utilizada:

- HI nuevo = 0,5 es el valor de la salud asignada a un activo nuevo;
- $\beta$ : Tasa de envejecimiento del activo calculada en el paso 3.
- Edad: es la edad actual del activo. En este caso de la bomba centrífuga, como en el paso 1, se ha considerado horas. Serían las horas que lleva funcionando la bomba desde el último overhaul. Para el ejemplo se considera que lleva funcionando 7.000 h.

Por lo que, aplicando la fórmula, el índice de salud actual inicial previsto sería de: 1,3

#### Paso 5; Índice de Salud Actual

El índice de salud actual (HI) se calcula:

$$HI(edad) = HIM_i (edad) \times MS(edad) \times MF(edad) \quad (16)$$

Siendo la notación utilizada:

- HIM<sub>i</sub>: Índice de salud actual inicial modificado
- MS: Modificador de salud
- MF: Modificador de Fiabilidad

Para el (HIM<sub>i</sub>), la ecuación es la siguiente:

$$HIM_i(edad) = HI_{nuevo} \times e^{\left(\frac{\beta \times edad}{Mc(edad)}\right)} \quad (17)$$

Siendo la notación utilizada:

- HI nuevo = 0,5 es el valor de la salud asignada a un activo nuevo
- $\beta$ : Tasa de envejecimiento del activo calculada en el paso 3
- Mc (edad): modificador de carga considerado para la edad del cálculo

Tras la definición de los modificadores de salud (MS) de la bomba centrífuga, se transforma la información recogida de la bomba en los valores necesarios para el cálculo.

Como se ha descrito previamente, los valores deben estar comprendidos entre 1 y 1,5. Al ser el punto donde se define el peso relativo del impacto de los modificadores, debe tenerse en cuenta que los valores cercanos a 1 tendrán poco impacto en la salud del activo. Cuando los valores sean mayores, tendrán mayor afección al ciclo de vida, significando un mayor deterioro aquellos que se encuentren muy cercanos al valor máximo de 1,5.

A continuación, se muestran los modificadores de salud definidos para la bomba centrífuga, así como los pesos y rangos establecidos. Se han reflejado en las Tablas 28, 29, 30, 31, 32 y 33.

Caudal	Escala
Dentro del rango óptimo	1
Por encima del rango óptimo	1.3
Por debajo del rango óptimo	1.4

Tabla 28; Valor del rango del modificador de salud; Caudal

Temperatura Aspiración GNL	Escala
Dentro del rango óptimo	1
Por encima del rango óptimo	1.3
Por debajo del rango óptimo	1

Tabla 29; Valor del rango del modificador de salud; T<sup>a</sup> Aspiración

$\Delta$ Temperatura GNL durante bombeo	Escala
Dentro del rango óptimo	1
Por encima del rango óptimo	1.3
Por debajo del rango óptimo	1

Tabla 30; Valor del rango del modificador de salud;  $\Delta$ Temperatura

Nivel del tanque	Escala
Nivel óptimo	1
Nivel alerta	1.1
Nivel crítico	1.2

Tabla 31; Valor del rango del modificador de salud; Nivel del tanque

Número de arranques	Escala
Menos de 40	1.1
Entre 40 y 80	1.3
Entre 80 y 120	1.4
Más de 120	1.5

Tabla 32; Valor del rango del modificador de salud; N<sup>o</sup> arranques

Nivel Vibraciones	Escala
Bueno	1.1
Seguimiento	1.2
Alerta	1.3
Peligro	1.4

Tabla 33; Valor del rango del modificador de salud; Nivel vibraciones

De la misma forma, una vez definidos los modificadores de la fiabilidad (MF), de la bomba centrífuga como son información correspondiente al fabricante, histórico recogido a lo largo del ciclo de vida de los equipos, el número de grandes mantenimientos y el tiempo de inactividad del mismo. Posteriormente se transformará la información en el peso resultante de aplicar la fórmula de ponderación.

Se recuerda que, al tener menor impacto en el ciclo de vida, los modificadores de fiabilidad se definen entre el rango de 1 a 1,2. Al igual que en modificador de salud, los valores más cercanos a 1 tendrán menor impacto en el ciclo de vida, y los valores mayores tendrán mayor consecuencia. En las Tablas 34, 35 y 36 se muestra un ejemplo de los valores definidos para los modificadores de fiabilidad, así como los modificadores concretos tenidos en cuenta:

Inactividad	Escala
0%-50%	1
50%-75%	1.05
75%-100%	1.1

Tabla 34; Valor del rango del modificador de fiabilidad; % Inactividad

Fiabilidad Fabricante	Escala
En la media	1
Inferior a la media	1.05
Superior a la media	1.1

Tabla 35; Valor del rango del modificador de fiabilidad; Fabricante

Nº de grandes mantenimientos	Escala
De 1 a 3	1
De 3 a 5	1.05
Más de 5	1.1

Tabla 36; Valor del rango del modificador de fiabilidad; Overhauls

En el ejemplo que se muestra, el objetivo es conocer el índice de salud calculado en el trimestre de operación previo al momento del cálculo. Para ello, se extraen los datos de la fuente de información donde se encuentren, que serán habitualmente diversos, pues se están utilizando valores de operación, de mantenimiento o incluso del propio fabricante. Lo habitual es obtenerlos directamente de los sistemas de origen (por ejemplo, el sistema de control), o utilizando herramientas intermedias como Business Intelligence (BI) que preparan la información de manera agregada y cuya comunicación con la aplicación donde se haya desarrollado el ISA sea más sencilla. Se muestran los valores de los modificadores de salud y fiabilidad estimados para este periodo en las Tablas 37 y 38.

Modificador	Valor
Caudal	1,18
Temperatura de Aspiración	1,00
$\Delta$ Temperatura	1,00
Nivel del tanque	1,00
Nº de arranques	1,30
Nivel de vibraciones	1.00

Tabla 37; Valor del modificador de Salud

Modificador	Valor
% de inactividad	1
Fiabilidad del fabricante	1.00
Nº grandes mantenimientos	1.05

Tabla 38; Valor del modificador de fiabilidad

Con toda la información recogida, ya se realizar el cálculo del índice de salud actual inicial modificado, siendo  $\underline{HIMi= 2,02}$

Llevando este dato a la fórmula del índice de salud actual, finalmente se tiene que el índice de salud actual es igual a  $\underline{HI= 4,75}$

Es importante comparar el índice de salud previsto inicial versus el actual, ya que en este último es donde han entrado en juego los modificadores. Se tendría por tanto:  $H_{Ii}=1,3$  vs  $H_I= 4,75$

En la Figura 47 se puede ver la representación gráfica donde se comparan ambos resultados.



Figura 47; Representación gráfica del Índice de Salud de Activos

La gráfica representada es la más utilizada por su sencillez de interpretación. Se sitúa en el eje de las ordenadas el valor del índice de salud, y en el eje de las abscisas las unidades de tiempo empleadas (en este caso las horas de operación). El símbolo utilizado es un círculo, donde la parte inferior debe coincidir con las horas de operación y el índice de salud inicial, y la parte superior debe coincidir con las horas de operación y el índice de salud actual. De esta manera se identifica rápidamente lo cerca o no que se está de la vida útil, y la degradación relativa respecto del cálculo teórico (a mayor diámetro del círculo, mayor diferencia entre  $IH$  inicial y  $IH$  actual, y por tanto mayor degradación relativa).

Se debe tener en cuenta que pueden existir otros modificadores de salud y fiabilidad dependiendo del tipo de activo a estudiar. El uso de unos modificadores en lugar de otros, va a tener mucho que ver con la experiencia y la opinión de los especialistas, ya que en los primeros pasos de la metodología tiene un carácter ciertamente subjetivo. Así pues, cabe la posibilidad de que en la definición de un primer modelo se obvian algunos conceptos de los que no se tenga un conocimiento claro del impacto, o que requieran de un mayor conocimiento para



ser incluido. Sin embargo, lo bueno de la metodología es que permite valorar la incorporación o eliminación de modificadores a medida que se vaya validando el impacto de los modificadores en el cálculo. Lo importante en ese punto será tener claro que proceso se llevará a cabo para la actualización periódica del modelo.

El resultado de aplicar esta metodología genera unos entregables que son básicos para la extensión de la misma a otros activos de la compañía. El primero de ellos el procedimiento. Es necesario que la metodología aplicada quede recogida en un procedimiento donde se describa el objetivo, definiciones, adaptación de la metodología al negocio de la Compañía, como es el caso del sector del gas, desarrollo de la misma, cálculo y justificación de los modificadores seleccionados.

Otros entregables serán el índice de salud calculado para los activos seleccionados y su representación gráfica, de manera que se pueda ver gráficamente el índice de salud. Se muestra un ejemplo gráfico, Figura 48, donde se podría comparar el índice de salud entre bombas centrífugas del mismo fabricante con diferentes horas de funcionamiento.



Figura 48; Ejemplo de comparación de activos en función del ISA

Para que esta metodología sea sostenible en el tiempo, se debe tener en cuenta una serie de factores relacionados con procesos, el CMMS y otros aspectos de IT.

- Sostenibilidad del índice de salud:
- Metodología procedimentada
- Accesibilidad a la información

- Integración en un sistema donde se pueda extraer y explotar la información
- Disponer de responsables de la metodología y mantenimiento del sistema

### 3.2.1.5. Resumen de resultados de la línea de investigación

El índice de salud de activos es una buena aproximación cuantitativa para la evaluación del estado de los activos en función del conocimiento experto cualitativo que se tiene de éstos.

Su resultado facilita la toma de decisiones a la hora de la adaptación o modificación de las estrategias de mantenimiento, ya que permite visualizar de un modo muy sencillo la salud actual de un equipo, y, por tanto, el riesgo asumido en el momento de la operación o mantenimiento de éste. Por ejemplo, en equipos donde el mantenimiento es realizado por horas de funcionamiento, el índice de salud dará una aproximación de cómo se encuentra el equipo y si realmente es necesario realizarle el mantenimiento por haber llegado a unas determinadas horas de funcionamiento o por el contrario, la instalación podría asumir que el equipo pudiera seguir funcionando.

También ayuda en la relación con los fabricantes y proveedores de los equipos, donde existe una relación contractual para la ejecución de los mantenimientos, ya que la instalación dispone, con el índice de salud, de una herramienta que le puede aportar un mayor conocimiento frente al propio fabricante.

En términos de extensión del ciclo de vida, también aporta información a la hora del cálculo del punto óptimo de reposición, cuantificando el riesgo que se asume al final del ciclo de vida, y por tanto ayudando al cálculo de la rentabilidad de un posible reemplazo.

De la misma forma, en el caso de los procesos de inversión, donde es necesario evaluar costes a futuros, el índice de salud es una buena aproximación matemática para poder justificar la evolución del correctivo. La mayoría de los modelos actuales tienen en cuenta tasas de fallos constantes sin tener en cuenta la tasa de envejecimiento. El impacto de este factor en cálculos cuyo ciclo de vida sea significativo (mayor a 15 años) puede ser determinante a la hora de tomar decisiones.

La metodología del índice de salud de activos ni evita, ni trata de sustituir las técnicas de mantenimiento específicas de los mismos, al contrario, éstas son necesarias para alimentar el propio índice de salud.

## **3.2.2. Integración del Índice de salud de activos dentro del cálculo de coste del ciclo de vida de un activo**

### **3.2.2.1. Consideraciones previas. Marco de aplicación**

Como hemos visto con uno de los gráficos comparativos de los diferentes tipos de activos en Enagás, el índice de salud de activos tiene valor en sí mismo. Más allá de las posibles aplicaciones posteriores, ser capaz de objetivar el estado de un activo industrial, y por tanto ser capaz de realizar comparaciones técnicas de manera metodológica, aporta una gran visión a la parte estratégica de la compañía.

Sin embargo, existen un conjunto de casuísticas a la hora de tomar determinadas decisiones en el ciclo de vida de los activos de alta capitalización, en los que el concepto de fin de vida útil es utilizado. Así pues, se presenta el objetivo de tratar de cuantificar el riesgo que se está asumiendo al llegar a esos momentos, para valorar diferentes estrategias, ya sea de mantenimiento o de sustitución de dichos activos. El concepto que se quiere trabajar, es valorar como se puede incluir el índice de salud de activos dentro de los costes totales del ciclo de vida, de manera que seamos capaces de integrar de manera económica el riesgo que supone utilizar activos con cada vez más mayores probabilidades de fallo al fin de su vida útil.

Ser capaz de transformar ese riesgo en un valor económico, va a permitir traducir un concepto técnico a veces bastante etéreo, en un concepto concreto y fácilmente comprensible por la dirección.

Así pues y durante el presente capítulo, se va a calcular el coste del ciclo de vida en base a un enfoque de gasto total denominado TOTEX (Total Expenditures), que adopta una visión holística para modelar el coste del activo. Se irá explicando según se vaya realizando un ejemplo práctico, que siempre tendrá como partida el índice de salud de los activos se ha estimado utilizando la metodología anterior.

Las técnicas del cálculo de coste de ciclo de vida utilizando el enfoque de gasto total, denominado TOTEX, que permite vincular el índice de salud de activos (que miden la condición de un activo de una instalación y lo próximo al final de su vida

útil que se encuentra) con los gastos incurridos en operación, mantenimiento y reinversiones en el activo a lo largo de su ciclo de vida, permitiendo:

- Comparar proyecciones de CCV de equipos situados en ubicaciones técnicas similares, para estudiar posibles variaciones necesarias en presupuestos, por mantenimiento adicionales a considerar para evitar deterioros prematuros, variación en reinversiones/overhauls previstos sobre los activos, etc.
- Comunicar con las partes interesadas, en términos de actualización de planes de negocio, etc.
- Comunicar de forma más precisa con fabricantes o proveedores de servicios de mantenimiento, para discutir aspectos contractuales que pudieran verse afectados por estos estudios.
- Dar soporte ante procesos de toma de decisiones en inversiones en futuras en activos, o en extensión de la vida de éstos.

El coste del ciclo de vida de un activo se determina computando los distintos costes devengados para el poseedor, por el activo considerado, a lo largo de toda su vida útil y después de esta, hasta su total eliminación o incluyendo un valor residual que tendría para el poseedor, en su contabilidad una vez finalizada para éste su vida útil.

Este coste incluye el valor de adquisición y el de todos los estudios, trabajos, desarrollos, etc., que serían necesarios, hasta su puesta en explotación y comienzo de la fase de operación y mantenimiento y todos los posteriores a este momento.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que estos costes han sido devengados en distintos momentos a lo largo de toda la vida del activo, por lo que, para poder computarlos, deberán actualizarse a una misma fecha, dependiendo ésta del propósito con el que se realiza el estudio. A estos efectos habrá que determinar las tasas de inflación y de descuento / capitalización a emplear, para actualizar los distintos costes a la fecha que se haya considerado. Todos los conceptos pueden verse en la formulación empleada en la ecuación 18:

$$ACCV(P) = CI + CO + CMP + CTPF + CMM \quad (18)$$

Siendo la notación utilizada:

- ACCV(P): coste del ciclo de vida, en valor actualizado
- CI: costes de inversión inicial en el activo
- CO: costes de operación
- CMP: costes de mantenimiento preventivo
- CTPF: costes totales por fallos (directos e indirectos)
- CMM: costes de mantenimiento mayor
- CD: costes de desmantelamiento
- VR: valor residual del activo al final de ciclo de vida (a deducir)

Para un estudio más general como el que nos ocupa, que como se verá aplica a un intervalo de tiempo determinado de la vida del activo, mediante el enfoque TOTEX se estimaran todos los costes incurridos para la operación, mantenimiento y reinversiones (costes de capital) en el activo durante ese periodo. No se incluirán los costes de adquisición e instalación del equipo, sino solamente las reinversiones producidas en las renovaciones que los grandes mantenimientos, que tuvieran lugar, suponen.

Se toma este criterio ya que el objetivo del estudio de costes es comparar los TotEx (CapEx + OpEx) que se producirían con distintas estrategias, con el fin de determinar las que minimicen estos costes. La parte de inversión inicial es común a todas ellas, por lo que a efectos comparativos se puede omitir, poniendo así de manifiesto las diferencias, de forma más clara.

### 3.2.2.2. Procedimiento de cálculo de ciclo de vida incluyendo parámetro ISA

Para explicar la integración del parámetro de índice de Salud de activos en el cálculo de coste del ciclo de vida, se va a proceder a describir un ejemplo ilustrativo. El activo en cuestión es un conjunto de dos compresores de gas natural cercanos al fin de su vida útil (gran mantenimiento) en el que se quieren comparar diferentes estrategias:

- **Estrategia 1:** Mantener las fechas actuales de los overhauls;
- **Estrategia 2:** Adecuar las fechas de los overhauls para evitar que las tasas de fallo aumenten, como consecuencia del

envejecimiento prematuro del equipo.

- **Estrategia 3:** Sustituir los activos actuales por dos nuevos de su misma capacidad.
- **Estrategia 4:** Sustituir los dos activos actuales por uno nuevo de mayor capacidad.

Para cada una de estas cuatro estrategias se estimarán de forma sucesiva los costes anuales hasta el año 2036 calculando así los diferentes Totex, viendo la diferencia económica entre las diferentes opciones.

#### Paso 1; Cálculo de la evolución del índice de salud de activos

A continuación, para conocer cual sería el índice de salud esperado de los dos compresores de boil-off en el horizonte de los 15 años de estudio, se proyectan los cálculos de índices de salud de los dos compresores de boil-off a partir de la fecha actual como se muestra en la Figura 49.

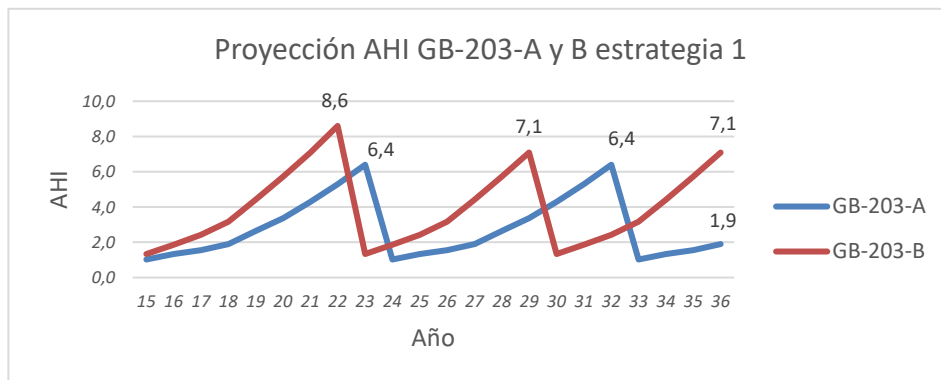


Figura 49; Proyección de ISA para la estrategia 1

Como se puede comprobar, el overhaul de ambos compresores sería recomendable en el próximo año para no aumentar la tasa de fallo y el riesgo del mismo. Si se continúa operando como se ha hecho hasta el momento, el overhaul del compresor GB-203-B debería realizarse este próximo año y el del compresor GB-203-A el siguiente.

Como se explicaba anteriormente, una forma de evitar que el activo alcance elevadas tasas de fallo causadas por su propio envejecimiento es adelantando los overhauls al período en el que el activo alcance  $AHI=5,5$ , cuando las tasas de fallo salen de un rango un controlado. De igual manera, se proyecta el índice de salud de ambos compresores teniendo en cuenta los adelantamientos de los overhauls pertinentes como se observa en la Figura 50.

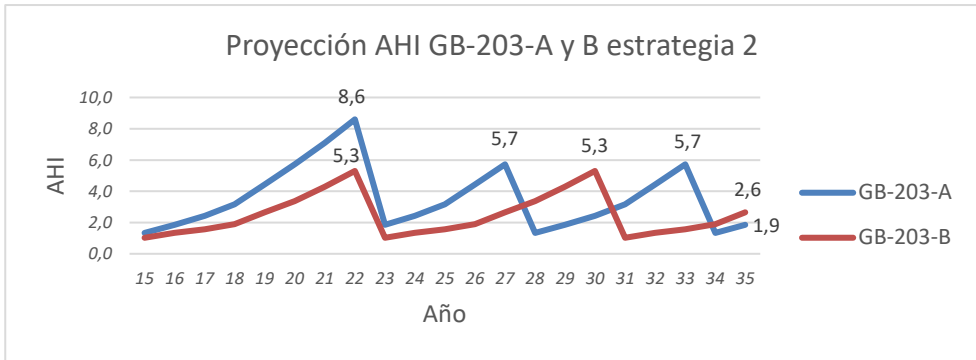


Figura 50; Proyección ISA para estrategia 2

## Paso 2; Vinculación del Índice de Salud de Activos con la probabilidad de fallo

Para cuantificar el riesgo, el aspecto clave es la vinculación que se va a realizar del índice de salud de fallo con la probabilidad de fallo. A la hora de definir el ISA, se hace en diferentes zonas (H1, H2, H3...) en función del su valor. Sin embargo, parte de la base de la metodología, es que ese valor cualitativo (Estado normal, primeros síntomas de fallo...) tiene una relación directa con la probabilidad o frecuencia de fallo. Es parte de la premisa a partir de la cual construimos la metodología.

El factor multiplicador a aplicar a todas las tasas de fallo promedio anuales de acuerdo se define con la siguiente expresión:

$$F_M = \left[ 1 + (C \cdot H) + \frac{(C \cdot H)^2}{2!} + \frac{(C \cdot H)^3}{3!} \right] \quad (19)$$

Entonces, para que esta tasa de fallo quede totalmente determinada se necesitan

obtener el valor de  $C$ . Es una 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.

La tasa de fallo para un equipo de alto deterioro ( $H(t)=10$ ) debe ser 10 veces la tasa normal de fallo.

$$10 = \left[ 1 + (C \cdot 10) + \frac{(C \cdot 10)^2}{2!} + \frac{(C \cdot 10)^3}{3!} \right] \quad (20)$$

Iterando puedo obtener un valor del parámetro  $C$ . Se obtienen las nuevas tasas de fallo, multiplicando cada una de ellas por el factor multiplicador resultante de la Ecuación 21.

$$\text{PoF} = K \cdot F_M \quad (21)$$

Siendo la notación utilizada:

- PoF es la probabilidad de fallo estimada dada situación actual del activo.
- $K$  es la tasa de fallo estándar del activo.

Para el caso de los compresores, no se dispone de información para la peor situación del compresor donde  $HI = 10$ , la peor situación que se encuentra es  $H = 6,4$  ya que es en este momento cuando tiene lugar el overhaul. Para este momento el  $F_M = 1,4$ , resulta de la relación entre la tasa de fallos en la peor situación del compresor (antes del overhaul) y la tasa de fallos cuando el compresor está como nuevo (justo después del overhaul).

$$1,4 = \left[ 1 + (C \cdot 6,4) + \frac{(C \cdot 6,4)^2}{2!} + \frac{(C \cdot 6,4)^3}{3!} \right] \quad (22)$$

De la Ecuación 22 se saca  $C = 0,065$ .

Por otro lado, se quiere impedir que el factor multiplicador de la tasa de fallos sea mayor que 4 para este caso. De este modo  $F_M=4$  para  $H = 10$ .



$$4 = \left[ 1 + (C \cdot 10) + \frac{(C \cdot 10)^2}{2!} + \frac{(C \cdot 10)^3}{3!} \right] \quad (23)$$

Sustituyendo estos valores en la Ecuación 23 y despejando la C se obtiene  $C = 0,145$ . Para estar del lado de la seguridad nos quedaremos con este último valor.

Las nuevas tasas de fallo se obtienen (haciendo uso de la ecuación 23) multiplicando cada una de las tasas originales por el factor multiplicador resultante de la Ecuación 22.

### Paso 3; Proyección del Opex, Capex y Totex futuro

La formulación utilizada para el cálculo del ciclo de vida es la siguiente:

$$TotEx(t) = OpEx(t) + CapEx(t) \quad (24)$$

La proyección de Opex para un período futuro  $t$  se obtiene de multiplicar la tasa futura de fallos por el coste unitario de los fallos, y a ese valor añadir los costes de operación y mantenimiento de los equipos

$$OpEx(t) = CO(t) + PoF(t) * CM + CMP(t) \quad (25)$$

La proyección de CapEx futuro se obtiene identificando los períodos de tiempo donde van a tener lugar los mantenimientos mayores, a partir de la estrategia determinada por la organización para fijar los mismos (en base a horas de operación, a salud del activo, u otra estrategia seleccionada)

$$CapEx(t) = CMM(t) * RMM(t, HI(t)) \quad (26)$$

Donde  $RMM(t)$  es una función booleana que determina si se realiza, o no, el mantenimiento mayor u “overhaul” (MM) en un determinado período de tiempo ( $t$ ) en base a una determinada estrategia (por ejemplo, en base a  $t$  o a  $HI(t)$ ).  $CMM(t)$ , es el coste del mantenimiento mayor a realizar en el período  $t$ . El coste de los mantenimientos mayores puede variar conforme varía la edad del equipo.

$$RMM(t) = \begin{cases} 1, & \text{se realiza MM en período } t \\ 0, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (27)$$

Los datos de entrada para este cálculo, suministrados por Enagás, se recogen en la plantilla que aparece en la Figura 51 y 52 para las estrategias 1 y 2, donde lo único que cambia es la fecha de overhaul.

Tag	Año construcción	Inflación =	3%
<b>GB-203A</b>	2010	Tasa Act=	10%
<b>Modelo de Coste de Ciclo de Vida</b>			
Tipo Coste		<b>RTA (BASE)</b>	
CI (C. Inversión)	<b>720.000,00 €</b>	<b>28.800,00 €</b>	Por año
CO&M (€)	Operación	<b>422.966,81 €</b>	Por año
	Preventivo	<b>2.356,24 €</b>	Por año
	Cambios de Banda	<b>1.470,00 €</b>	Por Unidad
CMM	Overhaul	<b>117.983,00 €</b>	Por Unidad
	Compressor		
CTPF - Mfi	Bandas		
		PoF (f/a)	CM&MO(€)
		TFS (hr)	Penal (€/hr)
		C Ind	CPF (€/año)
		1	5516
		0	0
		0	5516
		1	2959
		0	0
		0	2959

Figura 51; Datos para el modelo de costes GB-203-A

Tag	Año construcción	Inflación =	3%
<b>GB-203B</b>	2010	Tasa Act=	10%
<b>Modelo de Coste de Ciclo de Vida</b>			
Tipo Coste		<b>RTA (BASE)</b>	
CI (C. Inversión)	<b>720.000,00 €</b>	<b>28.800,00 €</b>	Por año
CO&M (€)	Operación	<b>514.419,09 €</b>	Por año
	Preventivo	<b>2.356,24 €</b>	Por año
	Cambios de Banda: horas 8000-10000	<b>1.470,00 €</b>	Por Unidad
CMM	Overhaul	<b>117.983,00 €</b>	Por Unidad
	Compressor		
CTPF - Mfi	Bandas		
		PoF (f/a)	CM&MO(€)
		TFS (hr)	Penal (€/hr)
		C Ind	CPF (€/año)
		1,5	5516
		0	0
		0	8274
		0,5	2959
		0	0
		0	1479

Figura 52; Datos para el modelo de costes GB-203-B

Tag	Año construcción	Inflación =	3%																		
GB-203A	2010	Tasa Act=	10%																		
Modelo de Coste de Ciclo de Vida																					
Tipo Coste		RTA (BASE)																			
CI (C. Inversión)	720.000,00 €	28.800,00 €	Por año																		
CO&M (€)	Operación	922.500,00 €	Por año																		
	Preventivo	2.356,24 €	Por año																		
CMM	Cambios de Banda	horas 8000-10000	1.470,00 € Por Unidad																		
	Overhaul	Año 10 o horas 40000	117.983,00 € Por Unidad																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PoF (f/a)</th> <th>CM&amp;MO(€)</th> <th>TFS (hr)</th> <th>hal (€/hr)</th> <th>C Ind</th> <th>CPF (€/año)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,5</td> <td>2206</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>3310</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1183</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1183</td> </tr> </tbody> </table>				PoF (f/a)	CM&MO(€)	TFS (hr)	hal (€/hr)	C Ind	CPF (€/año)	1,5	2206	0	0	0	3310	1	1183	0	0	0	1183
PoF (f/a)	CM&MO(€)	TFS (hr)	hal (€/hr)	C Ind	CPF (€/año)																
1,5	2206	0	0	0	3310																
1	1183	0	0	0	1183																
CTPF - Mfi	Compresor		Por año																		
	Bandas		Por año																		

Figura 53; Datos de modelo de costes estrategia 3

Tag	Año construcción	Inflación =	3%																		
GB-203A	2010	Tasa Act=	10%																		
Modelo de Coste de Ciclo de Vida																					
Tipo Coste		RTA (BASE)																			
CI (C. Inversión)	720.000,00 €	28.800,00 €	Por año																		
CO&M (€)	Operación	370.000,00 €	Por año																		
	Preventivo	2.356,24 €	Por año																		
CMM	Cambios de Banda	horas 8000-10000	1.470,00 € Por Unidad																		
	Overhaul	Año 10 o horas 40000	117.983,00 € Por Unidad																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PoF (f/a)</th> <th>CM&amp;MO(€)</th> <th>TFS (hr)</th> <th>hal (€/hr)</th> <th>C Ind</th> <th>CPF (€/año)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2206</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2206</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1183</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1183</td> </tr> </tbody> </table>				PoF (f/a)	CM&MO(€)	TFS (hr)	hal (€/hr)	C Ind	CPF (€/año)	1	2206	0	0	0	2206	1	1183	0	0	0	1183
PoF (f/a)	CM&MO(€)	TFS (hr)	hal (€/hr)	C Ind	CPF (€/año)																
1	2206	0	0	0	2206																
1	1183	0	0	0	1183																
CTPF - Mfi	Compresor		Por año																		
	Bandas		Por año																		

Figura 54; Datos de modelo de costes estrategia 4

En las plantillas que se muestran en las Figuras 53 y 54 se recogen los datos de entrada para la estrategia 3 y la estrategia 4. Se ha utilizado información facilitada por Enagás.

A continuación, se detalla la obtención de los datos de entrada:

- **CO:** el coste de operación al año se calcula teniendo en cuenta la potencia consumida por el compresor, el precio del kwh y las horas de funcionamiento al año de cada uno de los compresores.

- Estrategias 1 y 2: 3.700 h/año el compresor GB-203-A y 4500 h/año el compresor GB-203-B. La potencia consumida por los compresores se encuentra recogida en la información facilitada por Enagás.
- Estrategia 3: 3.700 h/año el compresor GB-203-A y 4500 h/año el compresor GB-203-B. La potencia consumida por los compresores se estima de un catálogo de fabricantes
- Estrategia 4: se consideran 4.500 horas de funcionamiento al año, el máximo de los dos compresores actuales. La potencia consumida por el compresor se estima en base a un catálogo de fabricantes.
- **CMP:** el coste anual de mantenimiento preventivo se obtiene de las órdenes de trabajo históricas de los equipos facilitado por Enagás. Se hace una media del gasto anual por preventivo de los dos compresores. Por otro lado, el coste del cambio de banda se obtiene de manera análoga. Este último también forma parte del coste total de mantenimiento preventivo.
  - Se ha supuesto el mismo coste de mantenimiento preventivo para las 4 estrategias
- **CMM:** para el coste del Overhaul se hace uso del histórico de órdenes de trabajo de Enagás. Se obtienen valores diferentes para el compresor GB-203-A y para el GB-203-B, el coste del Overhaul se obtiene finalmente como la media de estos dos valores al tratarse de equipos idénticos.
  - Se ha supuesto el mismo coste de mantenimiento mayor para las 4 estrategias
- **CTPF:** para los costes totales por fallo se necesita la tasa de fallos anual del compresor y de las bandas y el coste de mantenimiento para cada uno de ellos.
  - La tasa de fallos anual para cada compresor se obtiene del histórico facilitado por Enagás, como la media de avisos al año para cada uno de los compresores (quitando los avisos de las bandas).
  - La tasa de fallos anual de las bandas de cada compresor se obtiene



### 3.2.2.3. Resumen de resultados línea de investigación

Como se ha descrito en otros apartados de la investigación, es en la aplicación práctica donde se busca en valor de los conceptos investigados en las líneas previas de trabajo. En este caso, la comparación relativa ofrecida dentro del marco del resultado 3 de investigación, ya ofrecía valor en si mismo. Es cierto que la vinculación de la salud de un activo con la probabilidad de fallo, busca un resultado concreto (que se usará como resultado de esta línea de investigación). Sin embargo, debido al carácter subjetivo de las ponderaciones propuestas, siempre puede existir una duda razonable, especialmente en el periodo tan incipiente en el que se encuentra el proyecto.

Sin embargo, el carácter relativo de índice al respecto de la posible comparación de activos similares, va a ayudar a priorizar, y vinculándolo con el primer bloque de la tesis, va a permitir hacer una gestión indirecta del riesgo. Con un valor subjetivo de comparación, se pueden centrar los esfuerzos en aquellos cuyo diagnóstico es más desfavorable.

En cualquier caso, trata la presente línea de mostrar la aplicabilidad real del ISA, utilizado de manera concreta y no tanto relativa. La base de la formulación permite vincular el índice de salud con una probabilidad de fallo. De hecho, se parte de esa premisa para los cálculos de variables que definen la tasa de envejecimiento. Esta vinculación, permite hacer estimaciones con una tasa de fallo dinámica, variable en el tiempo. Es relativamente habitual utilizar conceptos como el propuesto para cálculos del coste del ciclo de vida, pero con tasas de fallo constantes y estimadas a raíz de la información que pueda o quiera proporcionar el fabricante o suministrador del equipo. En las formulaciones más clásicas, y precisamente por el riesgo de asumir dicho dato, la fiabilidad o tasa de fallo no es un factor determinante, no permitiendo en casos reales decantar una decisión de adquisición de equipamiento.

El ISA, permite ser mucho más detallado en cálculos de ciclo de vida mucho más longevos y con horizontes temporales mucho más amplios. Al tener en cuenta tantas variables, por mínimas que sean las diferencias, están integradas en el modelo y el impacto es directamente cuantificable. Es cierto que al final, y a modo de cálculo, es un concepto de coste, como existe en otras formulaciones. La diferencia es que ese cálculo es mucho más trazable y más real, al responder al funcionamiento histórico del activo y al conocimiento que se tiene del mismo.

En Enagás ya se ha utilizado con diferentes consideraciones:

- Para calcular el periodo razonable de operación de un activo: el supuesto es un activo cercano al fin de su vida útil, con una operación cercana de overhaul. Se pretendía calcular si era rentable hacer el overhaul y alargar el ciclo de vida o era el momento óptimo de reposición.
- Comparativa de tecnologías: si bien hasta ahora cuando se comparaban tecnologías el cálculo se centraba en reducción de emisiones o de costes operativos (electricidad, gas...) también se introduce el envejecimiento relativo de las diferentes tecnologías gracias al ISA.
- Cuantificación del riesgo: ante la imposibilidad de realizar la reposición de un activo (por motivos económicos o necesidad de la instalación), se calcula el riesgo que se está asumiendo por tener el activo operando.

Como se está mostrando, muchos de los ejemplos propuestos ya se trataban de determinadas formas con metodologías anteriores, pero el ISA garantiza mayor precisión y visibilidad del concepto de riesgo y ciclo de vida.





## 4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

---

A lo largo del presente documento se ha representado el camino seguido para la valoración y adaptación de estrategias de mantenimiento en un entorno industrial. Como se ha ido manifestando y destacando en muchos de los puntos, no sólo se trataba de valorar las estrategias desde un punto de vista de eficacia de las mismas, sino especialmente de su aplicabilidad.

La estructura del documento trata de reflejar el proceso de valoración y análisis en dos metodologías concretas que se integran en el modelo de gestión de mantenimiento de la compañía.

En el primer bloque, orientado a la gestión del riesgo, se ha tratado la metodología de Análisis de Criticidad. En el resultado R1, se ha procedido a la adaptación de la metodología para el sector del gas natural. Partiendo de una metodología publicada y con referencias, se ha considerado de manera genérica para instalaciones de gas natural, y más concretamente para Enagás como compañía. Se han puesto de manifiesto los grandes retos que supone una metodología semicuantitativa en la que se tratan de cuantificar aspectos cualitativos. Ha permitido por primera vez generar un proceso que involucra a muchas áreas de la compañía poniendo al activo realmente en el foco del mismo. Se han llegado a acuerdos transversales de valoración, que permiten un análisis claro y objetivo de criterios que hasta ese momento se movían en el ámbito de la opinión.

Solventada la parte más trasnversal y teórica, se ha mostrado un ejemplo práctico

de aplicación que demuestra la simplicidad del proceso, así como el racional del mismo. Con una base metodológica sólida, la implantación se resume en un proceso iterativo de análisis cualitativo que permite, salvada la parte inicial de conocimiento de la metodología, un análisis rápido de una gran cantidad de activos. El resultado gráfico de la matriz de criticidad permite una visión muy gráfica y sencilla de lo que la metodología trata de representar, lo que da mucha confianza a los gestores que tendrán que utilizarla como base de sus decisiones. Además, determinadas asunciones nos permiten que la digitalización de toda la información necesaria para la implantación y mantenimiento del proceso hayan sido fácilmente asumidas por la organización e integradas en el GMAO corporativo.

En el resultado R2 se ha puesto de manifiesto el impacto real que pueden tener las conclusiones obtenidas mediante la aplicación de la metodología. No sólo desde un punto de vista teórico y según propone un modelo de gestión teórico, sino con casos prácticos de aplicación real en la compañía. Así mismo, se puede confirmar que la estrategia está implantada en la compañía con resultados muy satisfactorios. Se han mostrado resultados cualitativos y cuantitativos que confirman como se ha implantado la solución en el actual modelo de gestión.

En el segundo bloque, se ha seguido un orden similar, con una metodología centrada en el ciclo de vida y con un impacto más centrado en activos de alta capitalización con gran impacto en la operación y el mantenimiento de las infraestructuras. Para conseguir el resultado R3, se ha partido de una metodología implantada en una empresa y con características similares (transporte de energía) para adaptarla a los activos de gas natural. Al igual que con la gestión del riesgo, se ha buscado en todo momento que cumpla los criterios de aplicabilidad antes descritos. Se han delimitado cuales son los activos de alta capitalización y se ha desarrollado y adaptado con las peculiaridades. Así mismo, se han implantado tanto en una versión de prueba, como en una herramienta tecnológica de la compañía. El modelo se encuentra en un proceso de mejora continua de acuerdo a la revisión de los resultados por los especialistas en base a la información disponible.

Por último, se ha aplicado en el resultado R4 para completar un análisis de coste de vida completo, donde el ISA permita dotar de valor añadido al concepto de salud del activo. Se ha representado un ejemplo concreto donde se ha mostrado como utilizar el indicador para impactar en decisiones estratégicas como puedan ser la

frecuencia de mantenimientos mayores, o la cuantificación del riesgo asumido al pasar de unas horas de operación concretas.

Se han completado todas las cuestiones de las que partían las líneas de investigación no sólo validando la base metodológica, sino con la aplicación práctica, rentable y sostenible de las metodologías dentro del mapa de procesos de la compañía.

Aún así, y al pertenecer a un proceso de mejora continua, tanto las metodologías, como su impacto en la estrategia, deben ser revisados de manera periódica para adaptarse a la realidad corporativa de la empresa en la que se ha implantado.



## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

---

Es una realidad palpable dentro del mundo industrial que el mantenimiento está experimentando un cambio muy profundo en los modelos de gestión de la compañía. No todas las empresas andan en el mismo momento de cambio, pero todas se encuentran en un proceso de transformación donde la gestión de mantenimiento se sitúa como pieza clave para conseguir los indicadores clave, ya no sólo del área como venía siendo históricamente, sino de la compañía.

El mantenimiento ha sido históricamente el área de coste “gestionable” más accionable desde la Dirección. Y mientras dicho coste no estuviera cerca del óptimo era relativamente sencillo accionar líneas de mejora que hicieran mejorar las cuentas de resultados. De hecho, las empresas generaron durante muchos años “planes de eficiencia” que manaban de una simple tormenta de ideas podía atacar factores claves de coste con grandes beneficios a corto plazo. Esto quizás fue el primer vector que permitió dar visibilidad al área de mantenimiento, y el comienzo del cambio de gestión de mantenimiento, a la gestión de activos.

Sin embargo y tal como se planteaba en la introducción, el reto ha sido, y sigue siendo, hacerlo de una manera segura y sostenible. Es ahí donde se pasa de tener visibilidad a tener importancia real. Asegurar que las medidas de hoy no tendrán consecuencias mañana, y que los ahorros que se consiguen, no requerirán de inversiones de remediación en unos años.

Así pues, los modelos de gestión de activos deben estar basados en un primer lugar, en una base metodológica sólida que permitan una gestión del riesgo real. El valor que proponen las líneas investigadas en la tesis reside tanto en la parte teórica

y más académica, como en la aplicabilidad real de las mismas. En segundo lugar, la digitalización, que permite una implantación real y sostenible de dichas metodologías.

Con una buena base metodológica, aplicada de manera ágil en una herramienta digital, realmente se puede impactar en la estrategia. En estos momentos en los que las decisiones tienen tanto peso por lo buenas que sean, como por la rapidez con que sean tomadas, una verdadera transformación digital va a ser clave para la supervivencia de las compañías. En el caso concreto de las empresas de gestión de infraestructuras, es por tanto clave tener herramientas que permitan conectar de manera sencilla y directa el mundo de la gestión con la realidad física de las instalaciones, y es ahí donde se ha tratado de mover el trabajo desarrollado en la presente tesis.

## 5.1. Conclusiones

Las metodologías de gestión de mantenimiento propuestas son esenciales para la determinación de la estrategia de la operación y el mantenimiento en activos industriales.

Para ello, en la tesis se han abordado dos aspectos sobre los que inciden las metodologías

- **Gestión del riesgo;** a través del análisis de criticidad se permite una segmentación rápida y sencilla de los activos de una instalación, de manera que permite identificar de manera objetiva que metodologías son más aplicables a los activos en función de su criticidad para la organización
- **Gestión del ciclo de vida;** a través de Índice de Salud de Activos se puede cuantificar el impacto de las variables físicas y de los principales aspectos de mantenimiento en el ciclo de vida de un activo, permitiendo cuantificar los daños relativos y el tiempo de vida remanente.

Esta conclusión general viene seguida de una serie de conclusiones particulares sobre alguno de los aprendizajes adquiridos durante el desarrollo de la investigación y más centrados en objetivos secundarios de la tesis, pero que parece relevante poner de manifiesto.

### **Selección de las metodologías con foco en aplicabilidad**

A lo largo del trabajo se han tratado de ejemplificar las técnicas en su parte más metodológica, sin incidir en la parte más empresarial. Son muchos los aspectos que sin ser propiamente metodológicos, pueden condicionar el éxito de la implantación; calcular el retorno de las inversiones propuestas, como hacer modelar y uso de los datos o la gestión del cambio de los usuarios son algunos de estos aspectos.

Sin embargo, hay uno sobre el que se ha hecho especial hincapié, que impacta mucho en el éxito de la implantación y que es intrínseco a la metodología, y éste es la aplicabilidad.

La aplicabilidad es por tanto uno de los factores más determinantes que se han considerado para dar validez y viabilidad a los proyectos de implantación de las metodologías en la estrategia de gestión de activos. Una metodología puede ser perfecta para el usuario, pero no tener impacto estratégico, o viceversa, que tenga gran impacto en el mapa de procesos de la compañía, pero su asunción e implantación efectiva sea insostenible. Por tanto, se ha buscado en todo momento esa aplicabilidad a través de los siguientes conceptos:

- Cumplir los objetivos que se buscan mediante la aplicación de la misma.
- Siendo metodologías transversales de común aceptación, su capacidad de adaptación al sector del gas natural
- Capacidad de comprensión de los resultados por los usuarios, pero con base técnica sólida para facilitar la toma de decisiones
- Posibilidad de realizar la implantación de las mismas con un consumo de recursos humanos y materiales razonables para la organización
- Que la actualización o mantenimiento de las mismas tenga un procedimiento claro y pueda ser automatizado
- Que pueda ser fácilmente implantable en herramientas tecnológicas garantizando una implantación efectiva en la operativa de los activos.

Las metodologías analizadas en la presente tesis cumplen todos y cada uno de los aspectos requeridos para garantizar una correcta aplicabilidad.

### **Equilibrio metodología y comprensión funcional**

Las metodologías sobre las que se ha trabajado en la presente tesis suelen tener como una de sus funciones principales, la capacidad de comunicar el ámbito técnico con el ámbito de gestión. Por eso se han focalizado gran parte de los objetivos y resultados en garantizar una base metodológica rigurosa, como una capacidad práctica relevante.

Este concepto se puede extrapolar al equipo encargado de adaptar e implantar las metodologías en la compañía. Y para ello, es importante encontrar el equilibrio entre mantener el rigor de la base técnica, con la facilidad de la comprensión funcional.

El ejemplo más sencillo para entender la propuesta sería la propia matriz de criticidad. Desde un punto de vista metodológico, hemos definido en todo momento la criticidad, como la multiplicación de la consecuencia por la frecuencia de fallo. Eso implicaría que las fronteras entre los valores críticos y semicríticos, o semicríticos y no críticos sería una línea continua. Sin embargo, con el fin de ser capaces de simplificar el modelo gráfico y representarlo como una matriz, se han segmentado dichas separaciones. Es una interpretación, que, sin traicionar el espíritu de la metodología, simplifica enormemente la comprensión y digitalización del proceso.

Ser capaz de encontrar ese equilibrio ha sido uno de los aspectos clave en la gestión del cambio con los usuarios y es uno de los aspectos que más se deben cuidar en las mejoras que sin duda se irán implantando a futuro.

### **Digitalización de los procesos**

Es difícil imaginarse cualquier metodología con impacto en la estrategia que no esté automatizado y digitalizado. Y esto es esencialmente por dos conceptos:

- La agilidad; tener un proceso digitalizado permite su ejecución y modificación de manera muy rápida.
- La analítica; el almacenamiento de la información permite la consulta y análisis de una manera muy ágil.

Por tanto, en el desarrollo de las metodologías, ha sido clave diseñarlas y parametrizarlas pensando en una vocación eminentemente digital. Tener una visión, aunque se a alto nivel, de donde va a desarrollarse la aplicación en los



sistemas industriales, ha permitido que ese proceso haya sido tremendamente ágil. Además, permite que todos los datos e información que proveen las metodologías sean accesibles por todos los niveles de la organización, lo que acelera el proceso de aprendizaje de los usuarios, acelerando a su vez el proceso de mejora de la metodología en sí.

### **Gestión del conocimiento**

Por último, se quiere destacar un aspecto más cualitativo, y probablemente el más intangible, pero también clave especialmente en la situación organizacional de grandes empresas como Enagás.

Generalmente, estas metodologías no cubren procesos que antes no se realizaran en la compañía. Hablando de análisis de criticidad, en ningún caso se podría afirmar que previamente Enagás no hacía gestión del riesgo. De la misma manera, no tener el índice de salud de activos no implicaba que los especialistas no supieran que factores impactaban en el ciclo de vida, ni que activos era prioritarios frente a otros.

Sin embargo, la decisión a tomar derivada de esa gestión del riesgo o gestión del ciclo de vida, no residía en ninguna metodología, sino en el conocimiento experto del trabajado en cuestión. En ningún caso se puede afirmar que el resultado no haya sido positivo, pues los indicadores de la compañía en términos de disponibilidad y costes han sido referentes en el sector durante muchos años.

Sin embargo, no dejaba de ser una dependencia significativa del factor humano, lo que ponía de manifiesto un riesgo de fiabilidad. Y lo que es aún más inminente, un riesgo de pérdida de conocimiento, pues muchos de los grandes especialistas de la compañía están o estarán en breve en procesos de jubilación.

Así pues, también se ha planteado el proyecto como un proyecto con una vertiente significativa de transmisión de conocimiento. Al definir los niveles de severidad en el análisis de criticidad, o los modificadores de fiabilidad en el índice de salud de activos, gran parte del trabajo ha sido entender el racional del valor propuesto por el experto y documentar la motivación del resultado. Esto ha derivado en un proyecto mucho más enriquecedor que si se hubiera enfocado exclusivamente como un proyecto de implantación.

Las metodologías van a permitir que el conocimiento experto de los especialistas, pase a ser un conocimiento corporativo de la compañía. Y eso es un valor intangencial, pero enorme como empresa de gestión de activos (79).

## 5.2. Líneas de investigación futuras

Son muchos los trabajos que pueden derivarse de las líneas mostradas en el presente trabajo de investigación, pues no dejan de ser metodologías muy transversales a la gestión de activos y por tanto con potencial en su desarrollo y mejora. Así pues se describirán de manera breve aquellas que puedan ser más relevantes, estando ya el Grupo de Investigación de Sistemas Inteligentes de Mantenimiento de la Universidad de Sevilla inmerso en alguna de ellas:

- **Mejora de Índice de Salud de Activos mediante metodologías de Inteligencia artificial;** si bien para la definición actual del ISA se ha partido del conocimiento especialista de los técnicos de la instalación, en un futuro y gracias a la captura, análisis y explotación de datos operativos, se podrían tener una valoración mucho más precisa y cuantificable del impacto de la operación y el mantenimiento en el ciclo de vida (80). Actualmente este proceso está limitado por el acceso a un buen histórico de datos y a la obtención de las variables necesarias.
- **Valoración dinámica del riesgo;** también apoyados por la tecnología, existen ya sistemas para una valoración dinámica del riesgo en activo lineales como los gasoductos, o redes ferroviarias. En instalaciones más estáticas, la relación entre el esfuerzo que hay que emplear para realizar valoraciones dinámicas frente a los resultados, no sale rentable. Sin embargo, en la medida en la que puedan digitalizarse determinadas variables (como pudiera ser el factor de utilización, demanda de una instalación...) podríamos ser capaces de adaptar las consecuencias e impactar en decisiones de mantenimiento con muchísima más agilidad.
- **Estándares de la metodología;** Actualmente tanto el modelo de análisis de criticidad como el del ISA para el sector del gas natural es absolutamente propio de Enagás. Sin embargo, en la medida en la que más agentes del sector asumieran dichas metodologías, las sinergias podrían ser mucho mayores. Especialmente en el Índice de Salud de Activos, donde tomando como ejemplo el regulador británico del que se ha partido para el desarrollo, la metodología es un estándar para reporte de la salud de los activos de todas las empresas del sector. De esa manera se objetiva el reporte del estado de los grandes activos para la priorización de los repartos económicos del sistema regulatorio (gasista en este caso)

- **Generación de vínculos con otras metodologías de gestión;** actualmente las metodologías están orientadas a unos resultados concretos, sin embargo, con pequeñas adaptaciones, se podrían ofrecer como entradas a otras áreas de gestión, como la contratación de servicios, o la gestión de almacenes. Vincular la prioridad de un repuesto o incluso su estrategia de reposición a la criticidad de un activo puede ser una entrada muy relevante para la optimización del inmovilizado. De la misma manera, manejar los niveles de servicio o puntos de rotura de stock en función de la salud del activo y por tanto su probabilidad de fallo, permite un ajuste dinámico y en tiempo real del almacén de soporte al mantenimiento
- **Uso de la fiabilidad del factor ISA para comparación de tecnologías;** en la presente tesis se ha utilizado el Índice de Salud de Activos para cuantificar la fiabilidad del activo concreto y monetizarlo como uno de los factores del coste del ciclo de vida de un equipo. Sin embargo, también se podría utilizar para proyectar el comportamiento futuro de dos tecnologías alternativas y ser capaz por tanto de valorar la sustitución tecnológica de activos de alta capitalización.



## 6. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

---

Según la normativa de la Universidad de Sevilla para la presentación de tesis por compendio de publicaciones, se exponen a continuación las publicaciones en las que he participado directamente y que avalan el trabajo desarrollado en este documento.

En un primer lugar se incluirán las publicaciones en revistas con factor de impacto por orden cronológico de publicación, presentándose estos trabajos como una copia completa. Y en segundo lugar se incluyen otros trabajos, pero solo a nivel de referencias.

A continuación, se presenta un resumen de éstas con la información más relevante, que sirve de clave para saber a que paper específico o capítulo se hace referencia en las tablas o imágenes que a lo largo de la tesis relacionan objetivos o resultados con publicaciones. En la Tabla 39 se muestra el resumen de las publicaciones con factor de impacto, y en la Tabla 40, capítulos complementarios.

ID	Título	Journal	Factor de Impacto
Paper 1	Criticality analysis for preventive maintenance optimization purposes in gas network infrastructures	Risk and Reliability	Q2
Paper 2	A model for lifecycle cost calculation based on asset health index	International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)	N/A
Paper 3	Integrating complex asset health modelling techniques with continuous time simulation modelling: A practical tool for maintenance and capital investments analysis	Computers in Industry	Q1

Tabla 39; Resumen de publicaciones con factor de impacto

ID	Título capítulo	Publicación	Editorial
Capítulo 1	Practical application of criticality analysis in the Spanish Natural Gas Transport Network	Proceedings Safety and Reliability Enhancement Throughout Europe: Looking Back, Looking Ahead	Ingeman
Capítulo 2	Criticality analysis for optimising OPEX cost lifecycle	IFAC-PapersOnLine	Elsevier
Capítulo 3	Defining Asset Health Indicators (AHI) to Support Complex Assets Maintenance and Replacement Strategies. A Generic Procedure to Assess Assets Deterioration	Value Based and Intelligent Asset Management Mastering the Asset Management; Transformation in Industrial Plants and Infrastructures	Springer

Tabla 40; Resumen de capítulos

## 6.1. Publicaciones en Revistas con Factor de Impacto

### 6.1.1. Criticality analysis for preventive maintenance optimization purposes in gas network infrastructures

Javier Serra Parajes

Asset Management Coordinator

Enagás, Madrid, Spain

Adolfo Crespo Márquez

Department of Industrial Management,

School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio Sola Rosique

INGEMAN. Association for the Development of Maintenance Engineering

School of Engineering, Seville, Spain

#### **Abstract**

Identification and quantification of cost and value of industrial assets is a field in which much terminology has been developed. When we try to analyze the importance of an asset for our business, the discussion about its costs should not be separated from the value provided by the asset. Most of the time, managers use the term “cost” because it seems to be more objective. The concept of value is more subjective and more difficult to define. However, we shall henceforth use definitions as amortization, inflation, or replacement value in order to simplify the concept of “value” to improve our decisions. The economic retribution of the facilities is based on a legal normative for regulated companies, so the concept of “cost” may turn out to be quite useless. Therefore, it is important to use a methodology that allows us to estimate the value of our assets. We have developed

a criticality analysis of our infrastructure in order to assess the relative value of these items for the company. The target is to optimize the operation and maintenance strategies at a corporate level. This must have a relevant impact on the OPEX of our company, and there may also be an impact on future CAPEX. This article is a case study of the methodology and presents clear examples of how operation and maintenance strategy is transformed according to criticality assessments.

### Publication details

Journal: Risk and Reliability

Publisher: Sage Journals

Vol 232, Issue 4, 2018, Pages 464-472

ISSN: 1748-006X

DOI: 10.1177/1748006X18785289

Proceedings of the  
Institution of Mechanical...



SJR 2020


0.52



powered by scimagojr.com



# Criticality analysis for preventive maintenance optimization purposes in gas network infrastructures

Proc IMechE Part O:  
J Risk and Reliability  
2018, Vol. 232(4) 464–472  
© IMechE 2018  
Article reuse guidelines:  
sagepub.com/journals-permissions  
DOI: 10.1177/1748006X18785289  
journals.sagepub.com/home/pio  


Javier Serra Parajes<sup>1</sup> , Adolfo Crespo Márquez<sup>2</sup> and Antonio Sola Rosique<sup>3</sup>

## Abstract

Identification and quantification of cost and value of industrial assets is a field in which much terminology has been developed. When we try to analyze the importance of an asset for our business, the discussion about its costs should not be separated from the value provided by the asset. Most of the time, managers use the term “cost” because it seems to be more objective. The concept of value is more subjective and more difficult to define. However, we shall henceforth use definitions as amortization, inflation, or replacement value in order to simplify the concept of “value” to improve our decisions. The economic retribution of the facilities is based on a legal normative for regulated companies, so the concept of “cost” may turn out to be quite useless. Therefore, it is important to use a methodology that allows us to estimate the value of our assets. We have developed a criticality analysis of our infrastructure in order to assess the relative value of these items for the company. The target is to optimize the operation and maintenance strategies at a corporate level. This must have a relevant impact on the OPEX of our company, and there may also be an impact on future CAPEX. This article is a case study of the methodology and presents clear examples of how operation and maintenance strategy is transformed according to criticality assessments.

## Keywords

Maintenance strategies, asset and maintenance management, lifecycle management and sustainability, decision support, criticality analysis, risk management

Date received: 2 July 2017; accepted: 28 May 2018

## Introduction

In this article, we explain how we have used the criticality analysis for maintenance purposes as a base for different working lines of operation and maintenance. Although the main target of the methodology is to optimize the maintenance strategies (as defined in EN 13306:2010)<sup>1</sup>, the concept of criticality allows us to obtain an indirect value of our facilities.

Most of the current quantitative techniques for assets criticality analysis use a weighted scoring method defined as variation of the risk priority number (RPN) method used in design.<sup>2</sup> This time, however, a very precise procedure must be considered when determining factors, scores and combining processes or algorithms;<sup>3</sup> unlike failure mode, effects, and criticality analysis (FMECA), now we assess assets criticality rather than failure modes criticality. At the same time, the analysis requires a very precise level of indenture in the functional structure of the network. The level of selected

indenture is the maintainable item, for which the maintenance plans are developed, resulting in a massive number of assets to assess (around 285,000 assets for the entire network, to this level). Later, inspection and maintenance activities on these assets will be prioritized on the basis of quantified risk caused by failure of the assets.<sup>4</sup> The high-risk assets will be inspected and maintained with greater frequency and thoroughness, to achieve tolerable network risk criteria.<sup>5</sup> The criticality assessment process to select in order to analyze the gas network infrastructure must fulfill the following requirements:

<sup>1</sup>Enagas, Madrid, Spain

<sup>2</sup>Industrial Management Department, School of Engineering, University of Seville, Seville, Spain

<sup>3</sup>University of Seville, Seville, Spain

## Corresponding author:

Javier Serra Parajes, Enagas, Paseo de los Olmos 19, 28005 Madrid, Spain.  
Email: jserra@enagas.es

1. The process must be applicable to a large scale of in-service systems within the network (around 285,000), for which preventive maintenance plans are designed.
2. The analysis should support regular changes in the scale adopted for the severity effects of the functional losses of the assets (this is a must to align maintenance strategy in dynamic business needs in current environments).
3. The process must allow easy identification of new maintenance needs for assets facing new operating conditions.
4. Connection with the enterprise asset management system of the company should be possible to automatically reproduce the analysis, with a certain frequency, over time.
5. The process should be tested in the network showing good practical results.

Because of these needs, the criticality analysis methodology as designed by Crespo Márquez et al.<sup>6</sup> has been selected. It was considered that would be easier to implement that others like Norsok Z-008,<sup>7</sup> for instance. In this context, the methodology fits well once the maintenance organization has important amounts of data for complex in-service assets, for which a certain maintenance strategy has previously been developed and implemented. The criticality analysis is accomplished with the purpose of adjusting assets maintenance strategies to dynamic business needs over time.

## Methodology

To adapt the methodology for criticality assessment, it is necessary to review the company goals and strategy, to ensure that those assets more relevant to meet the business needs are selected the most critical. In fact, the study of the consequences of assets functional failures and their frequency emphasizes the relative value of the asset to the business.<sup>3,8</sup> The most critical items won't probably be the most expensive ones, they won't even be the equipment with the most detailed maintenance plans, but they will be the equipment in which we spend more time and effort to make them work properly. Selected methodology will fit for this problem resolution, if we develop the following steps properly:

1. *Determine frequency levels and the frequency factors.* To manage the frequency levels, a form of Pareto analysis is used, in which the elements are grouped into  $z$  frequency categories according to their estimated functional loss frequency importance. For example, for  $z = 4$ , the categories could be named: very high, high, medium, and low functional loss frequency. The percentage of elements to fall under each category can be estimated according to business practice and experience for assets of the same sector and operational conditions. Then, average values for frequencies falling inside each group can be estimated and frequency factors per category are calculated.
2. *Determine criteria to assess functional loss severity.* This part of the analysis should reflect the business drivers recognized by management and shareholders.
3. *Determine criteria effect levels.* For the severity classification, this study focuses the attention on both, safety and cost criteria (similarly to MIL-STD-1629A).<sup>9</sup> For the safety severity categories, similar hazard severity categories to the ones used in MIL-STD-882C<sup>10</sup> are adopted. As cost factors, we may selected different criteria for which the functional loss effect can be classified in different levels that can, at the same time, be converted into cost using a certain contract or standard that the company must honor.
4. *Determine non-admissible functional loss effects.* The method requires the definition of those functional loss effects that would be considered as "non-admissible" for each specific criterion. The model will allocate a maximum value for overall severity (MS) to those assets (elements of the network) whose functional loss may produce non-admissible effects for any of the selected criteria. Therefore, those elements will become of maximum severity regardless their functional loss effect on any other criteria under consideration.
5. *Determine criteria weights in the functional loss severity.* Assigning criteria weights may contain a certain subjective judgments from the experts involved. In order to make this judgment as much consistent as possible, analytic hierarchy process (AHP) techniques can be used, and a model presenting the multi-criteria classification problem in a logic decision diagram can help to solve the multi-criteria decision sub-problem at the highest decision nodes of the diagram.
6. *Determine severity per criteria effect.* In the mathematical model proposed,<sup>6</sup> an effects severity matrix is defined, for any element included in the analysis
7. *Determine criticality limits.* This decision may condition organizational efforts to be dedicated later to the management of the different category of assets. This is a business issue, and consensus should be reached within the review team and the management team before any further process development.

This methodology has been developed with the premise that the results derived from the criticality analysis must be aligned with the priorities of the company. It implies that the methodology must serve the company targets, and not the contrary.

## The methodology adaptation

In the following paragraphs, we carefully adapt the methodology to the gas network infrastructure step by step.

### Determine frequency levels and frequency factors

The target of criticality analysis is to prioritize assets evaluating their relative importance for the company. The criticality concept is defined as the product of the failure frequency of an item multiplied by the possible consequence of its functional loss

$$\text{Criticality} = \text{Failure Frequency} \times \text{Consequence}$$

$$\text{CTR} = \text{FF} \times \text{C}$$

The first step is to determine the frequency levels and the frequency factors. Frequency levels let us to differentiate the assets by its failure recurrence. The frequency factor is the weight that we assign to each frequency level in order to use it within the criticality algorithm.

Before fixing the frequency factors, we must assign the limits or thresholds between these failure frequency levels. To manage the frequency levels, a form of Pareto analysis is used, in which the elements are grouped into four frequency categories according to their estimated functional loss frequency importance. The use of Pareto allows us to distribute all items properly in the matrix spectrum, in order to maximize the sensitivity of the methodology. Most extended models define four frequency levels (low, medium, high, and very high). Our technicians translated these theoretical levels into real management concepts:

- Possible failures;
- Acceptable failures;
- Repetitive failures;
- Non-acceptable failures.

In this case, the classification proposed by the theoretical model is near the same that the one used by the technicians. The company where the analysis is accomplished comes from a management style prioritizing, for many years, availability to efficiency. It is assumed that this fact led the excess of maintenance on the assets and obviously shows very low failure events. With this in mind, we can clearly explain that the majority of assets will be located within the lowest failure frequency band, named "possible failure." The frequency levels are classified with these definitions (Table 1):

Possible failures: an average value lower than one failure every 2 years;

Acceptable failures: an average value of one failure between 2 years and 1 year;

Repetitive failures: an average value between one and two failures per year;

Non-acceptable failures: an average value higher than two failures per year.

Once we have defined each level and the frequency failure thresholds, we must assign the failure frequency

**Table 1.** Frequency levels.

Annual frequency failure	Classification	Management definition	Management definition
$2 \leq f$	Very high	Non-acceptable failures	2
$1 \leq f < 2$	High	Repetitive failures	1.5
$0.5 \leq f < 1$	Medium	Acceptable failures	1.2
$< 0.5$	Low	Possible failures	1

factor. This value will be given to each frequency in order to compute a criticality value.

There are many different ways to assign the frequency factor to a level. If we follow the methodology, this value would be directly related to the numerical limits of the failure frequency defined for each level. In our case, we expect most of the items to be in the lowest level of frequency failure. We have given a value of "1" to this lowest frequency band. At the same time, we assume that more than two failures per year would not be acceptable for an item. Value of "2" is given in that case and the burdens in between are established proportionally (see Table 1).

### Determine criteria to establish functional loss severity

To define a certain objective criteria to assess an asset functional loss, most theoretical models propose the consideration of two main arguments: *cost* and *safety*. In our case, and in order to assure that the methodology is well aligned to the company strategy,<sup>11</sup> we have used the asset management policy of the company as a basis for the definition of this objective criterion.

Two main beams sustain the company policy for assets management: *assets integrity* and *business sustainability*. These beams support that every single action the company is accomplishing in operations and maintenance. Integrity goes first, and the pillars that support it are personal safety, industrial security, and environmental care. Sustainability is related to management efficiency and continuous improvement; it is based on assets integrity, and the pillars that sustain it are *availability*, *quality of service*, and *maintenance costs* (see Figure 1).

It is important to remark that criteria related to costs do not directly imply a certain monetary expense, even an estimated "profit loss" or "production loss," but they can also be related to reputational or image lost, repercussion on the stakeholders, or even hypothetical penalties for the loss of a certain service level. The criteria that are defined to accomplish the failure consequences analysis are as follows:

Safety-related criteria:

- *Safety*. The safety factor assesses the consequences of the functional loss of an element related to the following:

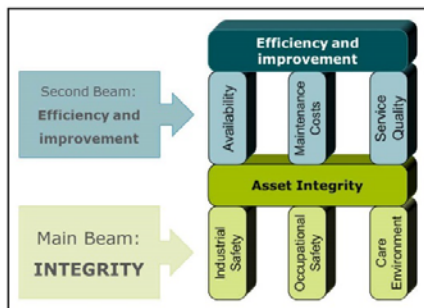


Figure 1. Summary of asset management policy.

- Occupational safety: injuries to internal or third party personnel in the facility, and/or any other person who could be involved.
- Industrial safety: damage to industrial assets, products and materials used in production.
- *Environmental care.* The environmental factor assesses the environmental consequences of the functional loss of an element, including recovery costs, penalties, compensation, and so on.

#### Cost-related criteria:

- *Quality of service.* The quality service factor assesses the impact of the functional loss of an element on the gas reception, delivery service conditions, and any other services that Enagas offers to its clients.
- *Availability.* The availability factor assesses the impact of the functional loss of an element on the installation's nominal capacity.
- *Maintenance costs.* The maintenance cost factor assesses the impact of the functional loss of an element on the corrective maintenance costs, including costs related with the recovery of the equipment and other equipment that may have been damaged.

Every single criterion has a specific weight in order to change subjective opinions of technicians into a numeric value, ranking the asset according to the importance of its function to meet business goals. The process followed to give weight to each criterion was agreed among all infrastructure managers and represents the relative importance of the criteria for the business. AHP techniques helped to solve this problem, and the reader is referred to Crespo Márquez<sup>10</sup> (section 9.4.1, steps of the process 6 and 7, pages 121 and 122, concerning the *Quantification of judgments on pair alternative criteria* and the *Determination of the criteria weighting and its consistency*) for a detailed description of the utilization of the AHP in this specific process. For instance, we just limited the method utilization to

the severity criteria level, not to the asset criticality classification level.

In the example of this article,  $\{w_i\}$ , weight given to the severity criteria  $i$  by experts, resulting from the AHP analysis are assumed to be equal to  $\{w_i\} = \{35, 15, 25, 20, 5\}$ . This means, for instance, that the review team considers the impact on quality of service to be five times more important than the expected cost of a failure on corrective maintenance cost.

#### Determination of criteria effects levels

The next step is to define the severity levels for each criterion. These levels will measure the severity of the consequences of a failure. In the same way that we have defined the failure frequency levels, the first step is to assess how many different levels must be defined for each criterion. In this project, the steering team decided that four levels was an optimum number to develop a precise and massive analysis.

For each criterion, we must determine the consequences that a functional loss implies. *Each definition must be as simple and explicit as possible.* If we are able to define it very simply, we will limit possible debates later, in the working groups. As an example, the criteria effects levels defined are as follows:

#### Safety criteria I—industrial safety:

- External impact on the facility in an inhabitable or vulnerable area or with fatalities or permanent disabilities: *Catastrophic.*
- High impact on the facility extinguished with external resources or external damage to an invulnerable area, or serious injury causing prolonged temporary disability: *Critical.*
- High impact on the facility extinguished with internal resources, or minor and reversible injuries to workers: *Moderate.*
- Slight impact on the facility extinguished with internal resources, or slight injury that does not affect work: *No Impact/Slight.*

#### Determine non-admissible effect

At this point, such functional losses shall be defined as “non-admissible.” This first requires deciding in what factor we might apply this concept. This consideration represents the allocation of the maximum punctuation, in total, in functional failure consequence to the asset (100 in our case), regardless of its results in the rest of the assessment.

Looking back at our asset management policy, we apply this “non-admissible” condition just in the factors that are related with *safety* and with *integrity* criteria. We have, therefore, defined the maximum level of severity in industrial safety and environmental criteria as non-admissible consequences:

**Table 2.** Criteria and severity levels.

Industrial safety (35%)		Environmental (15%)		Quality service (25%)		Availability (20%)		Maintenance costs (5%)	
Catastrophic	100	High	100	High	25	Very high	20	Very high	5
Critical	35	Medium	15	Medium	15	High	10	High	4
Moderate	20	Low	5	Low	5	Medium	5	Medium	3
Slight	0	No Impact	0	No Impact	0	Low	0	Low	1

- *Industrial safety.* External impact on the facility in an inhabitable or vulnerable area or with fatalities or permanent disabilities.
- *Environmental.* External impact on the facility in an inhabitable or vulnerable area.

#### Determine criteria weights in the functional loss severity

For this purpose, AHP was used, since the idea was also that, with this approach, both qualitative and quantitative criteria could be included in the classification scheme. In addition, the assignment of weights to the different parameters was considered as a very positive characteristic of the method.<sup>12</sup> Results of the selection of weights are presented in Table 2.

#### Determine severity per criteria effect

Table 2 is used for determination of the different scales of severity per criteria effect. Following the methodology, the reader can see how, for criteria having no non-admissible effects, maximum level of criteria effect severity is equal to the weight of the criteria. For those criteria presenting non-admissible effects, the maximum level of severity is assigned to the highest level of admissible effect. The complete table for assets valuation is presented in Table 2, in order to proceed with the subsequent assets value assessment.

#### Determination to criticality limits

According to organizational efforts to be dedicated to the management of the different criticality category of assets, and once it was understood the implications of the selected criticality matrix in Table 2, the criticality limits were placed at 50 and 90, representing low-to-mid and mid-to-high levels of criticality thresholds, respectively.

#### Using the methodology—preparing the value assessment

To prepare the correct use of the methodology, once adapted to the gas network, it was very important to follow a set of steps for the right criticality valuation. The steps are summarized as follows:

1. *Definition of the facility and its functionality:* the aim is to get a whole vision of the facility in which the item analyzed is working. Therefore, some analysis criteria are related to the whole plant. For example, availability or quality service is not analyzed for each item, but for the whole facility. It is very important to have the plant properly defined to make a correct assessment of the criticality.
2. *Definition of the system function:* focusing on the system where the asset is located, the concrete function of the system must be analyzed within the facility (emergency system, control system, etc.). It is important to know the real importance of the system for the correct operation of the plant.
3. *Definition of the item (asset under analysis) function and its operational context:* the final target for developing the criticality analysis is to analyze the consequence of a functional loss. That is the reason why this function must be defined: to pump, to close, to compress, and so on.
4. *Definition of the functional loss:* after having the item function defined, it is easy to suppose there is a functional loss. The key point in this step is to differentiate a fault to a functional loss. Every item has multiple possible faults, but just a single functional loss for every function of the item. If we consider that the function of an item is “to pump,” then its functional loss will be the “absence of pumping.”
5. *Failure consequence analysis:* the consequences of a hypothetical functional loss will be assessed in this step. Using the table defined in the previous chapter, the consequences of a hypothetical failure in every consequence criteria must be selected.
6. *Determination of the severity of a functional loss:* every criteria consequence has a numeric value that reflects the importance of the consequences for the company. In this step, these numeric values are collected in order to get a final severity value.
7. *Determination of the frequency of failure:* depending on the definition made in the previous section, each item failure frequency must be calculated in order to get the second parameter needed for the severity estimation.
8. *Calculation of the criticality level:* we can obtain the criticality level by multiplying the failure frequency by the severity level, both calculated in the previous steps.

## Practical implementation in the gas network—a case study

A simple example of the methodology implementation will now be described. The steps described in section “Using the methodology—preparing the value assessment” were followed to ease the process and to make it more consistent. We now try to highlight the key aspects of the analysis:

### 1. Definition of the facility and its functionality.

The facility analyzed in this case study is a valve position that provides gas to a measurement and regulation station (MRS). In the natural gas (NG) transport network, the NG is transported at high pressure (72 bars) within the pipeline, but in order to deliver NG to clients, the pressure of the gas is reduced to 16 bars in MRS. The functions of the valve position are as follows:

- To section the pipeline in case of leaking gas;
- To deliver NG from high-pressure network to the MRS.

In the system analyzed, items related to the process are mostly valves. There are other functions developed by other items of the facility related mostly with safety or control, but they are going to be omitted in order to simplify the example. We can show the facility scheme in the Figure 2. In the example we will focus on valve “a.”

### 2. Definition of the system function.

As exposed above, in this example, we focus on the analysis in the valves system, so in this case, the system function is the same as the facility function:

Valve “a,” as is shown in Figure 3, is a sectioning valve, and its function is to cut the NG flow through the pipeline in case of leaking.

### 3. Definition of item function and operational context.

The valve is motorized. In case of valve “a,” the condition is normally for the valve to be opened, in order to let the NG flow through the pipeline. So, the valve has two functions, to be opened in normal operation and to be closed and cut the NG flow if a leak is detected. With the second function, we can section the pipeline and limit the damage derived from a possible incident.

### 4. Definition of a functional loss.

Criticality analysis is a methodology that doesn’t analyze the hypothetical failure mode (breakdown,

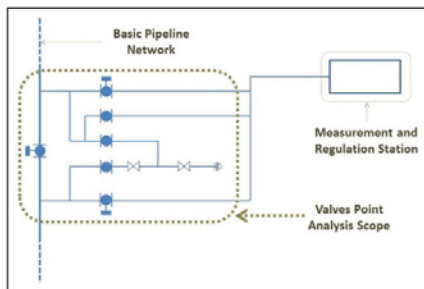


Figure 2. Schematic of the facility.

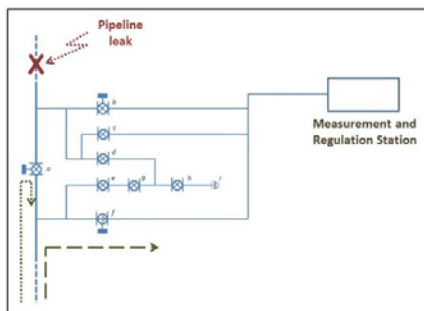


Figure 3. System's function.

misalignment, etc.); otherwise, it assesses the consequence of a functional loss independently of the cause of the failure.

That is the reason why it is so important to properly define the functional loss of every maintainable item. Moreover, each item has a main function (to pump, to compress, etc.), but they also have secondary functions (proper pressure, efficiency point, etc.). In order to simplify the analysis, it is important to just define the main functions. The functional loss over all the main and secondary functions should be studied, but one of the key points of the methodology is to analyze a large amount of items in a short period of time. If every function is included in the analysis, it could delay the development of the project. So, in this case, only the main functions will be analyzed, that is, “failed to open” and “failed to close.”

### 5. Failure consequences analysis.

In order to develop this step properly, it is important to be strict with the hypothetical situation and ask the correct questions that will let us assess the consequences of

Table 3. Practical example.

Industrial Safety (35%)		Environmental (15%)		Quality Service (25%)		Availability (20%)		Maintenance Costs (5%)	
Catastrophic	100	High	100	High	25	Very High	20	Very High	5
Critical	35	Medium	15	Medium	15	High	10	High	4
Moderate	20	Low	5	Low	5	Medium	5	Medium	3
Slight	0	No Impact	0	No Impact	0	Low	0	Low	1

a functional loss. The correct question that must be asked is: *What would be the consequence of a hypothetical failure of valve "a"?*

It is important to remark that functional loss must be assessed at the moment that its operation is required, so the consequences are negative for the facility. The analysis of a gas detector failure doesn't make any If it doesn't concern a gas leak. Without the presence of gas, a gas detector failure will never have any consequences. The right question for this example would be: *What would be the consequence of a gas detector failure, in case of a gas leak?*

It is also interesting to note that concatenated failures are not analyzed in criticality analysis. It means that in order to assess a consequence failure, the failure of the analyzed item must be taken into consideration and not hypothetical failures of any other related equipment. In the end, criticality analysis assesses the consequence of an item functional loss for every criterion defined previously. It implies the adaptation to the question that must be asked for every criterion:

- What would be the industrial safety consequence of a gas detector failure, in case of a gas leak?
- What would be the environmental consequence of a gas detector failure, in case of a gas leak?
- ...

The hypothetical situation estimated for the analysis is a pipeline leak. The possible consequences of a functional loss of the valve in the above depicted situation must be evaluated. As it has been defined previously, the valve has two main functions: to open and allow the NG flow across the pipeline, and to close to cut this flow. When two or more functions are analyzed, the highest mark of every assessment must be considered. In this case the most critical functional failure is the "failure to close" so that is the function that will be analyzed:

- *Industrial safety.* The target of the valve is to cut the pipeline section that has been damaged and in consequence to limit the NG flow across the pipeline avoiding risks related with the leak. If the valve could not be closed, there will be a high risk because NG would be emitted to the atmosphere and in consequence we will be subject to explosion risk. Therefore, the consequence of a valve

functional loss on industrial safety criterion will be "catastrophic."

- *Environmental care.* The assessment of this criterion is related to the NG emitted to the atmosphere. For the same reasons as the industrial safety analysis, if the valve could not be closed, NG would flow to the atmosphere. In this case, the consequence is assessed as "Low" because the environmental impact does not imply third parties.
- *Quality of service.* In this analysis, the consequence of the valve functional loss related to the clients must be assessed. In this case, the function of the valve point is to allow the NG flow across the pipeline and to deliver NG to the MRS. This is a clear example that shows the importance of the operational context of the analysis. A valve failure would not cut the NG delivery. In fact, the real problem is that the natural flow could not be cut. But the operational context defines that if a valve cannot be closed, the nearest valve must be closed. In this case, the NG flow would be cut and the delivery to the MRS would be interrupted. According to the severity levels definition, the consequence of this failure would be "high."
- *Availability.* In this criterion, it must be analyzed if the valve functional loss would imply a facility function loss. The facility has two main functions (defined previously). In this hypothetical situation, a valve functional loss would imply the loss of both functions; to cut the NG flow across the pipeline and to deliver NG to MRS. According to the severity levels definitions, the consequence of the failure would be "very high."
- *Maintenance costs.* This is probably the most objective criterion because the costs related to the hypothetical failure must be estimated. The technicians agree that the most common issues are failure of valves and then they will estimate an average price for the repair. In this case, it has been estimated that the cost would be between 600€ and 5000€, which means that the consequence failure related to this criterion would be "medium."

#### 6. Determination of the functional loss severity.

The next step is to obtain the rank of the possible consequences assessed in the previous chapter. See Table 3 defined by the technicians.

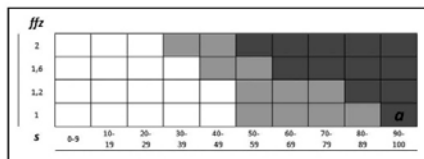


Figure 4. Criticality matrix example.

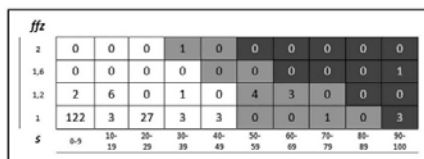


Figure 5. Valve point criticality matrix.

### 7. Determination of the frequency of failure.

This is probably the easiest step of the methodology. Just one requirement is needed: a good failure register of the facility. With these records, the data can be obtained almost immediately. If the register does not exist, there are alternative processes. The knowledge of the technicians or even public databases as OREDA can be used. In the example case, it estimated that these kinds of valves do not fail usually, so the frequency failure is “low.”

### 8. Calculation of the criticality level.

Finally, the asset must be located into the criticality matrix. It will be the graphic representation of the criticality analysis. The mark related to the severity of the functional loss is fixed on the x-axis. In the example, the failure of the valve has the maximum punctuation (related to industrial safety criterion). So, it is fixed at the right extreme of the matrix. The mark related with the frequency failure is fixed on the y-axis. In the example, the valve frequency failure is low, so the item is fixed at the bottom extreme of the matrix.

### Value of criticality

After an assessment of all items of a facility, we get the facility criticality matrix, as shown in Figure 4. We have analyzed more than 160 items for just one facility. The complexity of the assessment is to think about the possible consequence of a functional loss of a concrete item for every criterion. The work group must assign the mark of the severity criteria, according to the possible consequence that fits the definition of this severity criteria level. This task results in a very long and complex process.

Table 4. Assets distribution.

Criticality	Assets	Percentage
Not critical	164	92.3%
Semi-critical	9	5%
Critical	4	2.2%

Table 5. Reduction example of preventive maintenance.

Total preventive hours	Not critical preventive hours	Hours reduction
523	329	45
100%	63%	9%

The strength of the methodology is that we have obtained an objective assessment of the value of the equipment from the company point of view, starting out from a subjective analysis of possible failure consequences. These results of the example are shown in Figure 5.

The distribution of the assets depending on its criticality level is shown in Table 4.

At this point, it is important to remark that the criticality matrix is not a target itself. We have used the methodology as a tool for optimizing OPEX along the asset's lifecycle. The main point for us is to consider this methodology into a general continuous improvement model. In this line, the maintenance management model proposed by Crespo Márquez<sup>11</sup> suggests different maintenance engineering methodologies to develop depending on the relative position of the equipment into the matrix. In other words, the model suggests different methodologies depending on the relative value of the equipment for the company.

For example, for an asset with high recurrence of failures and high criticality, such an asset should be undergoing a failure root cost analysis (FRCA). With this methodology, we may not be able to optimize our maintenance plan, but we will be able to limit unscheduled stops in critical systems. As a result, we will avoid problems with our clients due to the unavailability of the facility. This assessment is indirectly done in the criteria definition.

For non-critical equipment, the methodology suggests a maintenance plans reviews base on “Risk-Cost Optimization (RCO).” We have also adapted this methodology in order to review all maintenance plans for non-critical equipment.

The company has focused its efforts on this methodology to save costs. RCO is based on adjusting the frequency of preventive maintenance and even avoiding some tasks turning maintenance strategy from preventive to a corrective one. In Table 5, the results of the valve point example are shown. RCO was applied just



**Table 6.** Global reduction of preventive maintenance.

Total hours	Non-critical assets hours	Hours reduction	Cost saved
446.516	303.630	38.400	960.009€
100%	68%	8.6%	

in non-critical preventive maintenance, saving around 9% of routine tasks.

Taking just one facility into account, it is not a remarkable result. Nevertheless, if we extrapolate the results for the rest of the company, we can reach significant cost savings. When the project began, total hours of preventive maintenance were 446.516. Enagas has an important number of facilities that include 3 regasification plants, 1.100 pipeline kilometers, 19 compressor stations, and 3 underground gas storages. After RCO has been applied for the rest of the company, preventive hours of maintenance plans has been reduced by 8.6%, so it is expected that more than 960.000€ can be saved (refer to the example in Table 6).

Coming from an intensive preventive maintenance plan, most of the time, we can prevent failure from happening, which is probably the most comfortable point, but not the most efficient one. RCO allows us to assume risks in non-critical assets to look for an efficiency strategy.

## Conclusion

In this article, we show a practical way to implement criticality analysis in a gas network, we exemplify the concepts and procedure using a valve position of the gas duct. We have demonstrated the importance of the concept of asset value, added to the consideration of the asset cost, to enrich asset management capabilities. The value concept will be depending on the nature and the specific sector of the company; and many other factors, apart from those considered in this article, that can be taken into account. Criticality analysis ranks your assets, with a simple methodology, assigning them a relative value for the business in its current context. We have learnt that this is a very powerful tool and a solid starting point for any action pursuing OPEX optimization over the assets lifecycle.

## Author Note

Antonio Sola Rosique is now affiliated to Ingeman, Camino de los Descubrimientos, Seville.

## Declaration of Conflicting Interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

## Funding

The author(s) received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

## ORCID iD

Javier Serra Parajes  <https://orcid.org/0000-0002-4417-8498>

## References

- EN 13306:2010. Maintenance terminology.
- Duffuaa SO, Raouf A and Campbell JD. *Planning and control of maintenance systems*. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, 2000.
- Moss TR and Woodhouse J. Criticality analysis revisited. *Qual Reliab Eng Int* 1999; 15: 117–121.
- Arunraj NS and Maiti J. Risk-based maintenance—techniques and applications. *J Hazard Mater* 2007; 142: 653–661.
- Brown SJ and May IL. Risk-based hazardous protection and prevention by inspection and maintenance. *Trans ASME J Press Ves Technol* 2000; 122: 362–367.
- Crespo Márquez A, Moreu de León P, Sola Rosique A, et al. Criticality analysis for maintenance purposes: a study for complex in-service engineering assets. *Qual Reliab Eng Int* 2016; 32: 519–533.
- NORSOK Standards:2001. Criticality analysis for maintenance purposes. Z-008 Rev.
- Puente J, Pino R, Priore P, et al. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *Int J Qual Reliab Manag* 2002; 19(2): 137–150.
- MIL-STD-1629A: 1997. US Department of defense, procedures for performing a failure mode and effects analysis.
- MIL-STD-882C: 1993. US Department of defense, procedures for performing a system safety program requirements.
- Crespo Márquez A. The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. London: Springer, 2007.
- Molenaers A, Baets H, Pintelon L, et al. Criticality classification of spare parts: a case study. *Int J Prod Econ* 2012; 140: 570–578.



## 6.1.2. A model for lifecycle cost calculation based on asset health index

Javier Serra Parajes  
Asset Management Coordinator  
Enagás, Madrid, Spain

Antonio de la Fuente Carmona  
Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Adolfo Crespo Márquez  
Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio Sola Rosique  
INGEMAN. Association for the Development of Maintenance Engineering  
School of Engineering, Seville, Spain

Antonio Guillén López  
Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Eduardo Candón  
Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Pablo Martínez Galán  
Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

**Abstract**

During many years, asset management methodologies used in industry were focused on knowing and analysing the operational control of the daily work and the impact of the maintenance on the availability. Later, the costs turn into the priority, and strategies were focused on assesses a longer lifecycle and optimizing processes and contracts. Finally, recent normative have included concepts as “knowing and managing the risks” and the target is to prioritize the maintenance tasks to the critical assets. However, taking a balanced asset management model for the operational environment, quite a lot of facilities of Oil&Gas sector are reaching the end of their initially estimated lifecycle. New challenges are related to extend the life of the main items of the facilities or at least, to find the optimal replacement moment that guarantees that the TOTEX is being optimized.

On the other hand, AHI methodology considers a theoretical lifecycle in which, depending on the proximity to the end of the useful life, the probability of failure increases. But take this theoretical lifecycle as a base, different operation location factors or O&M aspects can modify this period. All these factor are quantified and we are able to calculate a new theoretical profile.

This paper is about linking both methodologies, what enables us to compare future alternative cost profiles and assess the impact in the failure probability of the item. As a result, we are able to know the risk that is taken when we enlarge the operation of an item, and the impact in the operational costs. Capex and Opex have been traditionally used separately because were used for project or operational area and were focused on specific targets of each department. However, to developing methodologies that are focused on TOTEX guarantees the effectiveness of the asset management in long term results.

**Publication details:**

Book: International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC): Driving data-informed decision-making

Vol 1, 2019, Pág 91-98

Publisher: ICE Publishing

ISBN: 978-0-7277-6466-9

# A MODEL FOR LIFECYCLE COST CALCULATION BASED ON ASSET HEALTH INDEX

J. Serra<sup>1</sup>, A. de la Fuente<sup>2</sup>, A. Crespo<sup>2\*</sup>, A. Sola, A. Guillén<sup>2</sup>, E. Candón<sup>2</sup> and P. Martínez-Galan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Enagás S. A., Madrid, Spain

<sup>2</sup>Department of Industrial Management, School of Engineering, University of Seville, Seville, Spain

<sup>3</sup>Ingeman, Association for the Development of Maintenance Engineering, Seville, Spain

\* Corresponding author

**ABSTRACT** During many years, asset management methodologies used in industry were focused on knowing and analysing the operational control of the daily work and the impact of the maintenance on the availability. Later, the costs turn into the priority, and strategies were focused on assessing a longer lifecycle and optimizing processes and contracts. Finally, recent normative have included concepts as “knowing and managing the risks” and the target is to prioritize the maintenance tasks to the critical assets. However, taking a balanced asset management model for the operational environment, quite a lot of facilities of Oil&Gas sector are reaching the end of their initially estimated lifecycle. New challenges are related to extend the life of the main items of the facilities or at least, to find the optimal replacement moment that guarantees that the total expenditure (TOTEX) is being optimized.

Asset Health Index (AHI) methodology considers a theoretical lifecycle of an item, in which depending on the proximity to the end of the useful life, the probability of failure increases. But taking this theoretical lifecycle as a base, different operation location factors or operation and maintenance (O&M) aspects can modify this period. All these factors can be quantified and permit us to calculate a new theoretical profile.

This paper is case study based on the theoretical procedure and methodology proposed in previous literature (i.e. De la Fuente, Candón et al., 2018) to assess the impact of future failure probabilities of assets on lifecycle cost. The paper shows the impact of the AHI into a profitability calculation. AHI has enabled to compare future alternative cost profiles and assess the impact in the failure probability of the item. As a result, we have been able to change the maintenance strategy and optimise the TOTEX of an industrial equipment.

## 1. Introduction

The target of the paper is to develop a case study assessing the impact of the operation and maintenance in the lifecycle of an asset, and consequently, in the maintenance strategy. To develop it, it is going to be assessed the profitability of the investment in a replacement asset process. Traditional profitability analysis takes into account standard operational expenditures (OPEX) and capital expenditures (CAPEX) concepts. However, when these studies are made for long term investments or for long time periods, the evolution of these costs are simplified to constant values over time.

Some concepts are easy to calculate because they have a lineal or non-variable evolution. If the asset technology is well known, electricity consumption or CO<sub>2</sub> emission is a direct calculation. On the other hand, costs derived from the ageing of the assets as corrective maintenance are not easy to calculate and the methodology proposed supports in this aspect.

AHI provides an objective technical methodology to estimate the lifecycle bend and, in consequence, maintenance cost profiles in the future. This estimation enable us to use reliability index as availability in the investment study. CAPEX and OPEX have been traditionally used separately

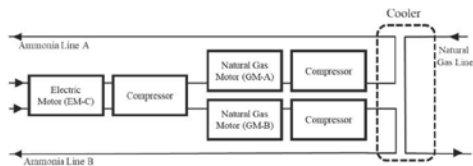
because were focused on specific targets; CAPEX for making the best investment, and OPEX for reaching operational efficiency. However, the methodology proposed is centred on TOTEX and look for the effectiveness of the asset management in long term results.

## 2. Scope

### 2.1 Definition

An Underground Storage of Natural Gas is used to store Natural Gas (NG) in low consumption periods (e.g. summer) and be able to use it in consumption peaks (e.g. winter). In the extraction process, NG flows mixed with water and other condensed products which are taken from the ground. To avoid mixing these products with the Gas Transport Grid, it is necessary to cool the gas. Water and impurities get condensed and can be eliminated. After that, NG get the right levels of water and hydrocarbons required by the law.

Figure 1 Basic system diagram



NG is cooled by two refrigeration lines whose refrigerant fluid is ammonia. This fluid must be compressed to maintain the heat exchange with NG. Three compressors are used for this process. These compressors are actuated for three motors of different technologies. Two NG motors used for compressors of line A and Line B, and a third electric compressor that can operate for both lines. The basic system diagram is shown in Figure 1.

As a result of the experience of the staff of the facility operating and maintaining the motors, it is proposed to change one of the NG motors for an electric one. It will avoid the CO2 emitted in the NG combustion and will optimise OPEX during the lifecycle of the item.

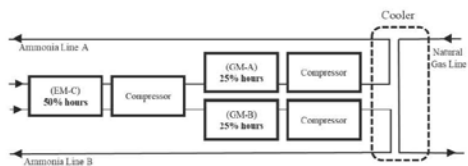
The target of the paper is to calculate the profitability analysis of the change, assessing the impact of the Health Index of the motors in the operation and maintenance costs. This methodology allows to estimate the impact of the ageing of an asset during the lifecycle.

### 2.2 Operation scenarios

According to the configuration of the system, electric compressor (EM-C) was used just as a backup of the NG ones.

As a result of the benefits of using the electrical motor the last year, the operating process time was divided at 50% for the electrical one and 50% for NG ones (25% for each one) as shown in Figure 2.

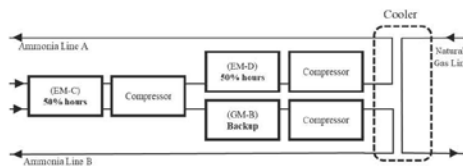
Figure 2 Current Operational mode



To maximize the benefits of the investment, the calculation is not only going to be based on the change of technology (GM-A for EM-D) but on the change of the operational mode. The scenario proposed uses electrical motors as main equipment, letting the NG one as backup. It implies that actual EM-C will work 50% of the time, and preferably on line B. On the other hand, the new EM-D will be used the other 50% of the time,

and can only work on line A. The new scenario is shown on Figure 3.

Figure 3 Proposal of new operational mode



This proposal has several benefits that are going to have impact in the payback of the investment:

- Improving the energy efficiency; electrical motors has better efficiency rates during the operation so it is assumed to be an optimised use of energy.
- Decreasing CO2 emissions; avoiding the use of NG as energy for the NG motors can decrease significantly emissions of gases derived of combustion process.
- Increasing reliability of the facility; failure rates of electric motors are significantly lower than NG ones. This factor increases the availability level of the facility.
- Optimising maintenance costs; electric motors does not require overhauls, so the scheduled availability increases against NG motors.
- Decrease the criticality of the asset; according to the criticality analysis, (Crespo et al. 2016), (Serra, Crespo & Sola 2018) NG Motors are more critical because of the environmental care impact. The change of technology decrease the criticality of the asset, and consequently provides the facility more flexibility in maintenance plans optimising processes.

### 3. Asset Health Index Calculation

AHI represents a practical methodology to quantify the general health of a complex asset. (De la Fuente, Gonzalez-Prida et al. 2018). The methodology is used to provide a mathematical base for supporting maintenance and replacement strategies. The index represent the asset conditioned based on a semi quantitative assessment of the factors that impact in the lifecycle of an item. With the assessment of the impact of the factors, we can use the results of operational observations, field inspections and laboratory tests, to simulate the lifecycle of an asset (Naderian et al. 2008). This estimation must help to know the future condition, and consequently the costs derived from the operation and maintenance.

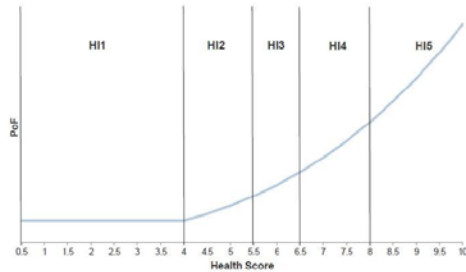
In this case, the methodology is going to be applied in the NG motor (GM-A). It is supposed that the electrical one is a new asset and the wear and tear during the period of the analysis is

not going to be relevant, so is not going to have impact into the global maintenance costs.

### 3.1 Background

AHI is used as is proposed by the UK DNO Common Network Asset Indices Methodology (UK DNO, 2017). AHI is considered as a dimensionless number between 0.5 (which corresponds to its status or condition as new equipment) and the value of 10 (corresponding to the condition of the equipment at the end of its useful life). The behaviour pattern of the AHI, is supposed to be exponential along the age of the asset. The Figure 4 shows the different five sections into which the health index of the asset is divided.

Figure 4 Asset Health Index Banding

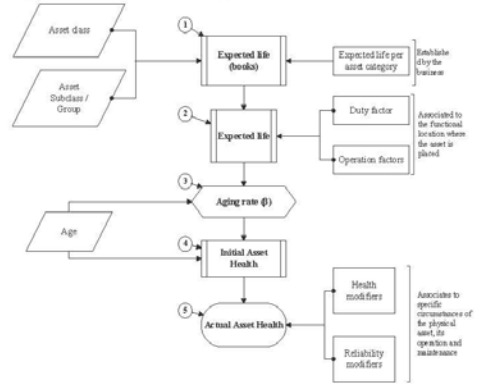


For every range, a specific behavior of the item is expected. The HI1 range comprised  $0.5 \leq AHI \leq 4$  values; for which the behavior of the equipment is assumed to resemble as new equipment. The HI2 range considers AHI values within the interval  $4 < AHI \leq 6$  and corresponds to the period of time when the first signs of deterioration begin to appear in the equipment. In this range, the value corresponding to  $AHI=5.5$ , is assumed to be the health index value equivalent to the normal life expected for the equipment category. From this point, three intervals are considered in the methodology: HI3, HI4 and HI5 as the AHI exceeds the values of 6, 7 and 8 respectively. The methodology assumes that exceeded the value of  $AHI=8$ , the equipment is at the end of its useful life.

### 3.2 Procedure

The methodology followed in this paper is based on a procedure consisting in five consecutive steps (De la Fuente, Cándon et al. 2018). It has been taken as reference because is a specific adaptation of the standard methodology to Oil and Gas equipment. Taking the theoretical estimated normal life based on the provider information and associate with a specific equipment category, several factors update this expected life. Every aspect related with the asset condition is taken into account and used in the methodology. This procedure is presented in Figure 5.

Figure 5 AHI calculation procedure



Using the theoretical procedure proposed (De la Fuente, Cándon et al. 2018), the practical application is going to be explained with the case study of NG motor (GM-A) following the five steps define previously.

**3.2.1 Asset selection and category definition:** In this first step, the identification of the asset and all the information regarding its functional location is addressed. According to ISO 14224 the asset is included in rotating equipment category and the equipment class is known as “electric motors”.

**3.2.2 Evaluation of the impact of location and load factors:** Once all the information in the previous point has been compiled, the location and loading factors are evaluated. This step will quantify the impact of the specific place of the asset, and the load conditions derived of it, into the expected life.

To calculate location factor ( $F_{LT}$ ), reference standards as DNO common network asset indices methodology proposes collections of factors, but these must be adapted to the type of facility and operational process. Location factors proposed for Underground Gas Storage are defined in Table 1, Table 2 and Table 3. The range and the value of the factors have been defined based on the experience and knowledge of the staff of the facility. The range that applies for GM-A is marked in grey.

Table 1 Location Factor; Distance to coast

Distance to coast (km)	Factor Value
0 Km – 1 Km	1
1 Km – 5 Km	1.05
5 Km – 10 Km	1.1
10 Km – 20 Km	1.15
> 20 Km	1.2

Table 2 Location Factor; Outside Temperature

Temperature (°C)	Factor Value
0 °C – 10 °C	1
10 °C – 20 °C	1.1
20 °C – 30 °C	1.2
> 30 °C	1.3

Table 3 Location Factor; Height above sea level

Height (m)	Factor Value
0 – 500	1
500 – 1000	1.1
1000 – 2000	1.2
> 2000	1.3

If there are several parameters that impacts in location factor calculation, the methodology defines that

$$F_{LT} = \max(F_{LT1}, F_{LT2}, F_{LTx}) \quad (1)$$

In this case, the first location factor ( $F_{LT1}$ ) is distance to coast and the facility is off-shore, so the distance is 0 km and the factor value is 1. The second factor ( $F_{LT2}$ ) is outside temperature. The average value is 21°C throughout the year so the factor value according to the Table 2 is 1.1. Finally, the height above sea also conditioned the expected life of the asset. In this case the facility is at sea level and the factor value is 1. As a consequence, the Location Factor is 1.1 as shown in equation 2:

$$F_{LT} = \max(1, 1.1, 1) \quad (2)$$

To calculate load factor ( $F_L$ ) it is necessary to measure the load requested during operation in the specific location against the maximum admissible load measured during the start-up process of the equipment.

$$F_L = \frac{\text{Load normal conditions}}{\text{Maximum admissible load}} \quad (3)$$

After running test, the load measure for nominal conditions is 90% of maximum admissible. In this case, the load factor ( $F_L$ ) is 0.9. According to the methodology we can now calculate a new estimate life as a result of the equation

$$\text{Estimated life} = \frac{\text{Normal life}}{F_{LT} \times F_L} \quad (4)$$

The normal life defined by the provider is 25000 hours. It is the operation time until the overhaul must be done. Consequently, is the expected life noted by the provider in which the failure rate is the standard one, so the AHI is under 5.5.

According to the evaluation of the impact and the location, the estimated life is higher and is expected to be under the standard failure rate until 25253 operation hours.

**3.2.3 Calculation of the aging rate:** A fundamental hypothesis of the chosen methodology is that the aging of an asset has an exponential behaviour with respect to its age. This aging can be calculated through the parameter aging rate, and permit us to use this rate for express mathematically the behaviour of failure rate during the lifecycle.

The calculation is

$$\beta = \frac{\ln \frac{HI_{new}}{HI_{estimated\ life}}}{\text{Estimated life}} \quad (5)$$

Where:

$\beta$  = Aging rate.

$HI_{new}$  = 0.5 Health index corresponding to a new asset;

$HI_{estimated\ life}$  = 5.5 Health index corresponding to an asset arriving to its estimated life;

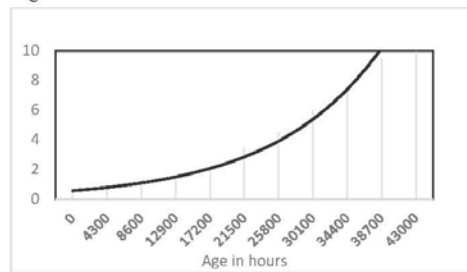
**3.2.4 Obtaining the Initial Health Index:** After calculating the aging rate, we are able to obtain the Initial Health Index. This new Index represents an adaptation of the theoretical provider expected life into a new real expected life condition by the specific installation place (defined by location factors) and with a specific load condition (defined by the load factor). As a result, we obtain a graphical result shown in Figure 6.

$$HI_t = HI_{new} x e^{\beta t} \quad (6)$$

Where:

$t$  = the current age of the asset (in units of time)

Figure 6 Initial Health Index



**3.2.5 Calculation of the Real Health Index:** In the last step, the aging of the asset can be increased or decreased by other modifiers that conditioned the operation and the maintenance. These factors are divided into three categories; reliability, load and healthy modifiers.

Reliability modifiers are shown in Table 4, Table 5 and Table 6, and represents the results of the operation rules of the asset:



Table 4 Reliability Modifier; Inactivity Operating Time

Inactivity (%)	Modifier Value
0 % – 50 %	1
50 % – 75 %	1.05
75 % – 100 %	1.1

Table 5 Reliability Modifier; Provider

Provider (average reliability)	Modifier Value
Under range average providers	1.05
Into range average providers	1
Upper range average providers	1.05

Table 6 Reliability Modifier; Overhauls number

Overhauls (number)	Modifier Value
1-3	1
3-5	1.05
>5	1.1

The healthy modifier is shown in Table 7 and quantify the impact of the specific operation parameter into the lifecycle of the asset. In this case the continuous start-ups of the machine:

Table 7 Health Modifier; Number of start-ups

Start-ups (number)	Modifier Value
< 40	1
40 < x < 80	1.2
80 < x < 120	1.4
> 120	1.6

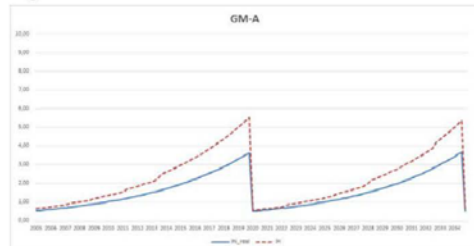
Finally, operating an asset out of load range can modify the expected life, and it must be represented by AHI. In this case it is represented in load modifier (Table 8).

Table 8 Load Modifier; Operating Load

Average Operation Load	Modifier Value
Into the recommended range	1
0% < X < 15% out of range	1.3
15% < X < 30% out of range	1.5

The result of the process is shown in Figure 7 and includes the comparison between the initial health index and the current health index.

Figure 7 HI initial vs HI real



Having defined all the parameters, and calculated all the factors, we can finally obtain the Real Health Index ( $HI_r$ ). This value shows the most objective estimation of the age of an asset. It is calculated according to the next equation:

$$HI_r = HI_{new} \frac{t}{M_L} \times M_H \times M_R \quad (7)$$

Where:

$M_L$  = Load Modifier

$M_H$  = Healthy Modifier

$M_R$  = Reliability Modifier

### 3.3 AHI Results

Depending on the design of the model, and the values of the modifiers, the Health Index, and consequently, the lifecycle, can be increased or decreased against the theoretical proposed by the provider. These results can be used as a base for management decisions (Table 9). Knowing the factors that impact in the health and calculating the HI, allow us to prevent premature aging and advance maintenance tasks. On the other hand, it also allows us to optimise operation and extending the life of the asset. With this information, we can adjust the maintenance plan and optimise the OPEX.

The results of the AHI calculated for motor (GM-A) shows that, because of the operation mode of the motor, its lifecycle is being shortened. According to the Health Index, the overhaul must be made in advance of at least two years. The Health Index in 2019 will reach 5.5, which is the moment when the failure rate can increase and consequently, impact into the reliability of the asset. This overhaul in advance, causes that in the period used for profitability calculation (15 years) two overhauls must be made instead of one. This change impacts directly in the economical result.

Table 9 Load Modifier; Operating Load

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

## 4. Profitability Calculation

### 4.1 Considerations

To analyse the impact of the lifecycle maintenance cost of the motors into the profitability calculation, Internal Rate of Return (IRR) has been used as the main indicator to assess the benefits of the investment. To simplify the analysis and avoid unnecessary data, there have not been included all parameters that do not change between the scenarios that are going to be compared (replacing GM-A by EM-D or keeping it on GM-A).

**4.1.1 Operational considerations:** the operation parameters considered for the investment assessment are the energy consumption of the motors (NG for GM-A and GM-B or electricity for EM-C and EM-D) and the CO<sub>2</sub> emitted in the NG combustion.

The operation scenario has been defined previously. To maximize the hypothetical benefits of the replacement, the proposal is not just to change the motors but to use electrical ones as the main equipment and leave the second NG motor (GM-B) as backup item. As a consequence, it is necessary to consider not just the energy savings of GM-A, but adding GM-B. In the assessment we have consider a 90% of operational savings in GM-B. 10% of the operation time is maintained, considering the hypothetical backup operation of the motor, and the time used for periodical maintenance start-ups.

According to the previous consideration, CO<sub>2</sub> emissions have been calculated estimating a total saving of GM-A emissions and a 90% of GM-B emissions.

**4.1.2 Maintenance considerations:** maintenance costs have been simplified into two concepts to simplify the assessment. Firstly, the general maintenance costs which includes periodical preventive maintenance and standard corrective maintenance (derived from the average failure rate). Based on AHI value, asset condition is supposed to be under 5.5, so corrective standard costs are fixed during the lifecycle. Secondly, the overhaul, which includes the major maintenance if it is required. In this case, this overhaul is just necessary for NG motors, and this factor is going to be critical in the calculation of profitability. Overtaking or delaying overhauls has a direct impact in the costs of the lifecycle.

**4.1.3 Price considerations:** To complete the analysis, it is necessary to take parameter prices as reference. All prices has been estimated with the recommendation of the specifics specialist departments of the company. However, for the business profitability calculation, parameters as CO<sub>2</sub> ton or electricity has very variable prices and the margin of uncertainty is important. In this case, for the theoretical demonstration of the impact in the lifecycle, these prices have been considered fixed. The price used for electricity is 0,07€/kWh and for CO<sub>2</sub> is 9,55€/Ton. The IRR calculation requires also use specific economical parameters. The three economic factors considered have been; the discount rate (25%), the increase of consumer price index (2%) and the investment amortization period (15 years)

**4.1.4 Investment considerations:** To complete the comparison of the changing of the motor, it is necessary to include the costs needed for the installation of the new asset. In this concept are included all the costs; the asset, works necessities for the installation, facility adaptation to new asset, engineering work hours, disassembly old equipment and control system modification. The value of these costs is 340k€.

### 4.2 Calculation of Internal Rate of Return

To approve investment proposals, companies requires a clear profitability value. The key performance indicator to assess this viability is the Internal Rate of Return. The value required depends on the company. In most cases, no investment is approved with values lower than 6% (a standard value of the Return Rate just for investing in the bank). The higher the IRR, the greater the probability the investment was approved.

To analyse the IRR, a standard spreadsheet has been used. Costs savings derived from the replacement of NG motor has been considered with positive value. In Table 10 are detailed direct costs of operation and maintenance of GM-A which are going to be eliminated because of the replacement:

Table 10 Cost Savings; GM-A

Concept	Asset	Value (k€)	Periodicity
Overhaul	GM-A	140	25,000 h
Maintenance	GM-A	10	Annual
Natural Gas	GM-A	30	Annual
CO <sub>2</sub> emissions	GM-A	1,83	Annual

As it has been explained previously, it is also considered the savings derived from the operational change mode. It implies a 90% reduction of annual costs, and not taking into account a hypothetical overhaul of GM-B, because the operational hours will not reach 25,000 hours during the investment calculation. The detail is shown in Table 11.

Table 11 Cost Savings; GM-B

Concept	Asset	Value (k€)	Periodicity
Overhaul	GM-B	140	Not used
Maintenance	GM-B	9	Annual
Natural Gas	GM-B	27	Annual
CO2 emissions	GM-B	1,65	Annual

New costs derived from the installation of the EM-D, has been considered in the spreadsheet with negative value and are detailed in Table 12.

Table 12 Cost Increase

Concept	Asset	Value (k€)	Periodicity
Overhaul EM	EM-D	0	Not applied
Maintenance	EM-D	4	Annual
Electricity	EM-D	50	Annual

**4.2.1 Calculation without AHI:** If the assessment was done without including AHI concept, the calculation was normal. The only singular point would be to estimate when is going to be the overhaul done. Assuming annual operation hours defined in the base case, there will be necessary just one overhaul during the lifecycle of the investment (15 years) which might be done in the fifth year of the cycle (according to the actual situation of the asset). Using standard data into the spreadsheet and with the considerations defined along the paper, the IRR will be 7.54%. Figure 8 represents a simplified image of the spreadsheet. It includes the first year (moment of the hypothetical investment), the second year (that is the example for the rest the years) and the year where the overhaul is going to be executed.

Figure 8 IRR spreadsheet without HI

Concepts	Euros	Frequency	year 1	year 2	year 6	year 16
Overhaul GM	140,00	25000 h			140,00	
Maintenance GM-A	10,00	annual		10,00	10,82	13,19
Maintenance GM-B	9,00	annual		9,00	9,74	11,83
Maintenance EM	-4,00	annual		-4,00	-4,33	-5,28
Operation Natural Gas GM-A	30,00	annual		30,00	32,47	39,38
Operation Natural Gas GM-B	27,00	annual		27,00	29,23	35,63
Electric consumption EM-D	-50,00	annual		-50,00	-54,12	-65,97
CO2 Ton GM-A	1,83	annual		3,83	4,14	5,03
CO2 Ton GM-B	1,65	annual		3,45	3,73	4,55
<b>EBITDA</b>			29,28	17,69	38,63	
Amortization			-22,67	-22,67	-22,67	
<b>EBIT</b>			6,61	-4,98	15,96	
<b>EBIT * (1-4)</b>			6,96	-11,77	11,97	
Amortization				22,67	22,67	22,67
Total Investment			-140,00			
<b>Cash Flow</b>			-140,00	27,62	134,43	34,64
<b>Cash Flow (sin amortizaciones)</b>			-140,00	27,62	134,43	34,64
<b>IRR</b>			7,54%			

**4.2.2 Calculation with AHI:** When the assessment is done taking into account AHI, some key aspects change significantly. The curve that represents  $H_t$  (Figure 7) demonstrate that the asset condition is worse than expected for current working hours. The factor that have more influence in the wear and tear is the healthy modifier. It results in major maintenance being advanced four years. Even a second overhaul must be done into the analysis period. With these data

included in the spreadsheet (Figure 9), IRR changes significantly, increasing the value until 10,56%.

Figure 9 IRR spreadsheet with HI

Concepts	Euros	Frequency	year 1	year 2	year 3	year 16
Overhaul GM	140,00	25000 h		140,00		140,00
Maintenance GM-A	10,00	annual		10,00	10,20	13,19
Maintenance GM-B	9,00	annual		9,00	9,18	11,83
Maintenance EM	-4,00	annual		-4,00	-4,08	-5,28
Operation Natural Gas GM-A	30,00	annual		30,00	30,60	39,38
Operation Natural Gas GM-B	27,00	annual		27,00	27,54	35,63
Electric consumption EM-D	-50,00	annual		-50,00	-51,00	-65,97
CO2 Ton GM-A	0,00	annual		2,53	3,91	5,03
CO2 Ton GM-B	0,00	annual		3,45	3,57	4,55
<b>EBITDA</b>			169,28	29,86	178,62	
Amortization			-22,67	-22,67	-22,67	
<b>EBIT</b>			146,61	7,19	155,96	
<b>EBIT * (1-4)</b>			109,96	5,40	116,97	
Amortization				22,67	22,67	22,67
Total Investment			-140,00			
<b>Cash Flow</b>			-140,00	132,62	28,96	139,64
<b>Cash Flow (sin amortizaciones)</b>			-140,00	132,62	28,96	139,64
<b>IRR</b>			10,56%			

## 5. Conclusion

The use of the methodology of AHI for the profitability calculation has had a deep impact. It has conditioned significantly the maintenance strategy during the lifecycle of the investment.

It is not only the final 4% of difference in the IRR between the calculations without AHI against the one with AHI. The reason that make the investment more realistic, is the knowledge of the real status of the asset. This knowledge enables us to turn a subjective assessment of asset condition into a mathematical calculation

The application of the methodology allows us to know that the operational mode of the Gas Motor has decreased significantly its lifecycle. Assuming the information given by the provider, it could be possible to reach 25.000 operation hours. And this scenario is not necessarily wrong. The AHI allow us to determine the risk that it is being assumed by waiting until the overhaul. Or even if it is possible, to advance this major maintenance, ensuring that the asset condition is good enough.

In a business profitability assessment, non-linear costs are the values most difficult to estimate. Especially when the asset is reaching the end of the useful life, it is difficult to quantify the increase of the costs derived from the wear and tear.

Finally, is also important to remark that one of the most valuable aspects of a semi quantitative methodology, is the knowledge management. In this paper all the parameters of the procedure (modifiers, factors...) are assumed. But the process of obtaining the necessary agreements by the specialist, implies to sharing the knowledge, and recording deliverables. For companies with specialists with more than 40 years, and consequently, close to retire, it is essential to keep the knowledge of these staff and ensure that their experience is going to be maintained in the company.

## 6. References

- De la Fuente, A; Candón, E; Martínez-Galán, P; Crespo, A; Sola, A and Moreu, P. (2018). Asset health index method for a process pumps fleet. *Industria química*, ISSN 2340-2113, Nº. 57, 2018 (Special AICHEMA 2018), Pp. 38-43.
- UK DNO Common Network Asset Indices Methodology. (2017). Health and Criticality. Version 1.1. January 30th.
- Crespo Márquez, Adolfo; Moreu de Leon, Pedro; Sola Rosique, Antonio; Gómez Fernández, Juan Francisco. Criticality Analysis for Maintenance Purposes: A Study for Complex In-service Engineering Assets. En: *Quality and Reliability Engineering International*. 2016. Núm. 32. Pag. 519-533.
- De La Fuente, A.; González-Prida, V.; Guillén, A.; Crespo, A.; Sola, A.; Gómez, J.; Moreu, P. (2018). Strategic view of an Assets Health Index for making long-term decisions in different industries. *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World*. Haugen et al. (Eds). © 2018 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-8153-8682-7. Pp 1151-1156
- ISO 14224, Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.
- Naderian, A., S. Cress, R. Piercy, F. Wang, and J. Service. 2008. "An Approach to Determine the Health Index of Power Transformers." Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (July 2008):192–96.
- Serra Parajes, J.; Crespo Márquez, A; and Sola Rosique, A. "Criticality analysis for preventive maintenance optimization purposes in gas network infrastructures," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.*, 2018.Ges

### 6.1.3. Integrating complex asset health modelling techniques with continuous time simulation modelling: A practical tool for maintenance and capital investments analysis

Adolfo Crespo Márquez

Department of Industrial Management,

School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Javier Serra Parajes

Asset Management Coordinator

Enagás, Madrid, Spain

Antonio de la Fuente Carmona

Department of Industrial Management,

School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio Sola Rosique

INGEMAN. Association for the Development of Maintenance Engineering

School of Engineering, Seville, Spain

#### **Abstract**

An Asset Health Index (AHI) is a tool that processes data about asset's condition. That index is intended to explore if alterations can be generated in the health of the asset along its life cycle. These data can be obtained during the asset's operation, but they can also come from other information sources such as geographical information systems, supplier's reliability records, relevant external agent's records, etc. The tool (AHI) provides an objective point of view to justify, for

instance, the extension of an asset useful life, or to identify which assets from a fleet are candidates for an early replacement, or renovation, as a consequence of a premature aging. This paper describes how to build the AHI model as a continuous time simulation model, which is then implemented using Vensim simulation environment. This is done in order to: 1) improve model formulating robustness, 2) benefit of the outstanding software optimization features for AHI model parameters calibration; and 2) easy the provision of predictions for asset degradation, operational and capital investments risk under different possible exogenous scenarios and endogenous managerial options. The process of model building, and parameterization is applied to an industrial case of a regasification terminal. Several strategies involving major maintenance scheduling are compared in terms of total expenditure in assets over their life cycle

**Publication details:**

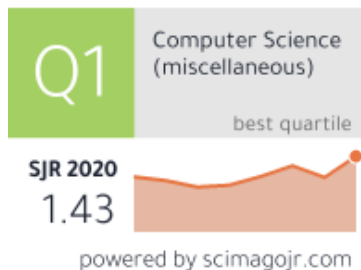
Journal: Computers in Industry

Publisher: Elsevier

Volume 133, December 2021, 103507

ISSN: 0166-3615

DOI: 10.1016/j.compind.2021.103507

**Computers in Industry**



# Integrating complex asset health modelling techniques with continuous time simulation modelling: A practical tool for maintenance and capital investments analysis

Adolfo Crespo Márquez<sup>a,\*</sup>, Javier Serra Parajes<sup>b</sup>, Antonio de la Fuente Carmona<sup>a</sup>, Antonio Sola Rosique<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Industrial Management, School of Engineering, University of Seville, Spain

<sup>b</sup> Engas, Department of Technical Services, Madrid, Spain

<sup>c</sup> Ingeman, Association for the Development of Maintenance Engineering, Seville, Spain

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 21 February 2021

Received in revised form 14 June 2021

Accepted 28 June 2021

Available online 16 September 2021

### Keywords:

Assets management

Capital investment

Operation and maintenance decision making

Life cycle analysis

Assets health

## ABSTRACT

An Asset Health Index (AHI) is a tool that processes data about asset's condition. That index is intended to explore if alterations can be generated in the health of the asset along its life cycle. These data can be obtained during the asset's operation, but they can also come from other information sources such as geographical information systems, supplier's reliability records, relevant external agent's records, etc. The tool (AHI) provides an objective point of view to justify, for instance, the extension of an asset useful life, or to identify which assets from a fleet are candidates for an early replacement, or renovation, as a consequence of a premature aging.

This paper describes how to build the AHI model as a continuous time simulation model, which is then implemented using Vensim simulation environment. This is done in order to: 1) improve model formulating robustness, 2) benefit of the outstanding software optimization features for AHI model parameters calibration; and 2) easy the provision of predictions for asset degradation, operational and capital investments risk under different possible exogenous scenarios and endogenous managerial options.

The process of model building, and parameterization is applied to an industrial case of a regasification terminal. Several strategies involving major maintenance scheduling are compared in terms of total expenditure in assets over their life cycle.

© 2021 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introduction

An Asset Health Index (AHI) is an asset score, which is designed, in some way, to reflect or characterize the asset's condition and thus, its performance in terms of fulfilling the role established by the organization (De la Fuente et al., 2021a). AHI represent a practical method to quantify the general health of a complex asset. For simple assessments, CBM technologies can precisely estimate the status of and specific asset with defined and specific failure modes. However, most of these assets are composed of multiple subsystems, and each subsystem can be characterized by multiple modes of degradation and failure. From a pure theoretical perspective, every failure mode of every item that composes a system can be modelled and estimated. In some cases, it may be considered

that an asset has reached the end of its useful life, when several subsystems have reached a state of deterioration that prevents the continuity of service required by the business (Hjartarson and Otal, 2006a). This calculation can be complex and a significant investment in time and resources. It is in the case of complex systems where the health index, based on the results of operational observations, field inspections and laboratory tests, produces a single objective and quantitative indicator. It may be used as a tool to manage assets, to identify capital investment needs and maintenance programs, allowing (Naderian et al., 2008; Naderian et al., 2009; Azmi et al., 2017): 1) Compare the health of equipment located in similar technical locations, to study possible premature deterioration and optimize operation plans and/or asset maintenance if necessary; 2) Communicate more accurately with manufacturers/builders, to understand the behaviour of assets of different manufacturers/builders in specific technical locations; and 3) Support decision-making processes in future investments in assets, or in extension of the life of these (Silvestri et al., 2020).

\* Corresponding author.

E-mail address: [adolfo@us.es](mailto:adolfo@us.es) (A. Crespo Márquez).

Asset Health Indicators are widely used in supporting maintenance and replacement strategies based on asset condition and performance in some countries, to justify asset replacement schemes to the regulators (GB DNO groups, 2017; Australian Local Government Association, 2015; Federation of Canadian Municipalities (FCM) & other seven partner organizations, 2021).

A proper design of a health index should meet the following requirements (Hjartarson and Otal, 2006b):

- The index must be indicative of the suitability of the asset to provide continuity to the service and representative of the general health of the asset.
- The index should contain objective and verifiable measures of the condition of the asset, instead of subjective observations.
- The index must be understandable and easily interpreted.

Several methods and models fulfilling these requirements have been reviewed, for instance, the ones by Kinetricks (Naderian et al., 2008; Naderian et al., 2009), DNV GL (Vermeer et al., 2015), Terna (Scatiggio and Pompili, 2021) and GB DNO (GB DNO groups, 2017).

Although most of these models build a streamlined approach to introduce different influent factors to estimate the lifetime expectation/remaining useful life of an asset, several drawbacks are still present in their model formulation:

- i) The AHI procedure seems not to be properly robust from the scientific perspective, original models are built mostly by practitioners in specific sectors with very specific assets.
- ii) Many influent factors are evaluated based on assumptions that are never discussed (e.g. ranges of numerical values are given as scales for different factors while it is almost unclear what is the basis to define such ranges);
- iii) The procedure proposed is mainly presented in its development and never demonstrated completely with, at least, some case-based reasoning or at least a complete industrial case which would enable a proper validation of the AHI model proposed.

There are approaches in the literature to identify asset health (López de Calle et al., 2019) used mainly in CBM applications based on dynamic health assessment, but the concept is different from the one used in this paper, now the health assessment allows comparison and decision-making among different assets.

To overcome these weakness points, in this paper the methodology adopted to model the AHI is only loosely based on the OFGEM Network Asset Indices Methodology (GB DNO groups, 2017) (similar approach as in the example previously presented in (Crespo Márquez et al., 2020)). This method is selected because it is considered simple for simulation model building purposes and very practical in its implementation, if a more robust scientific design of the model format is reached.

More precisely, the method (GB DNO groups, 2017) requires: 1) The identification of the asset, which includes the category of the equipment under study, the current age, the expected life, the name of the manufacturer/builder, the model of the equipment and the location of the installation; 2) The operation and maintenance data recorded during a certain period of time; and 3) The condition of the equipment, that is, the results of the analyses performed on the equipment in site, results of readings of physical variables, results of visual inspections, etc.

The health index model adopted in this paper contains values between 0.5 and 10, thus being able to compare health between different types of assets. There are other indices that go from 0 to 1 and others that go from 1 to 100. In any case, they all have the same functionality, normalize the health of different assets to be able to compare them with each other.

In order to provide the modeling process with a more scientific approach and robustness, continuous time simulation modelling is used in this paper. This method offers high rigour for writing mathematical equations, and to help to trace and to understand the importance of model existing feedback loops. Finally, the models developed using this methodology support multiparametric optimisation, that will result essential for parameters calibration and model validation activities in this work (García, 2018).

Regarding the continuous time dynamic simulation adopted, in this paper difference equations in the simulation models are used, and as suggested by (García, 2018). We will assume, however, that that change in our system occurs at discrete points in time (when the information is retrieved) and that each variable at time  $t + 1$  will be a function of the current values:

$$x_{t+1} = f(x_t)$$

where  $f(x_t)$  may be either a linear or nonlinear. Notice that for the equation to be solved the initial value of the variable  $x_0$  should be known and it is assumed that the time of the simulation will be advanced in fixed time increments and that all system variables will be recalculated at each time increment. The time increment of the simulation matches the time step for which the data is retrieved from the systems. The modelling methodology followed has been System Dynamics (see a complete list of approaches in (Powell, 2021)), and some of the system dynamic tools such as the stock and flow diagrams (SFDs) will provide a graphical representation of the model and variables typology at a glance (Powell, 1968) (some other innovative uses of system dynamics models, integrated with other modelling methodologies, can be found in (Institute of Assets Management (IAM), 2016; Vermeer et al., 2015; Teixeira et al., 2012)). The software package used for the implementation of the model equation is Vensim, a registered trademark of Ventana Systems Inc. (the reader can find other Vensim models' materials in (Scatiggio and Pompili, 2021)).

Finally, and to overcome above mentioned drawback number iii), the process of model building, and parameterization is applied to an industrial case of a regasification terminal. Several strategies involving major maintenance scheduling are compared in terms of total expenditure in assets over their life cycle. This can provide a precise understanding of the benefits of the methodology for businesses and industry.

## 2. A simulation model to advance in robustness and practical implementation

As mentioned in the abstract and Introduction Section of this paper, despite the fact that Asset Health Indexing (AHI) is becoming a very popular tool, there is a clear need for research to make their implementation more practical in real life applications and within existing engineering assets and management systems (Crespo Márquez et al., 2020). In particular, we find interesting to improve in the following aspects:

- Easy the implementation of the mathematical model of the AHI.
- Use the simple model format in (GB DNO groups, 2017), but now taking the advantages of dynamic simulation model optimization features for model parameters calibration, according to an specific asset dataset.
- Improve results precision and optimization of the future asset management policies, specially those related to major overhauls, life extension or equipment renovation. This will be possible thanks to new capabilities to project FHI under different scenarios as well as the possible management strategies, optimizing parameters defining those policies.



- Easy simulations and what-if scenario analysis for AHI and LCC projections.
- Fast modification and update of the model parameters and projections results according to new data registered and/or expected operational changes.
- Etc.

To that end, in the sequel the process that will be followed is explained in Fig. 1. The formal AHI mathematical model with GB DNO groups methodology is explained in Section 3. Then, this mathematical model is translated into a continuous time formal simulation model in Section 4, where some system dynamics methodology and process elements are used to describe variables typologies and relationships among the different simulation model elements. In Section 4, the loss functions used is described and its equations presented. In Section 5 the implementation of the formal simulation model in Vensim language is presented. In the same Section it is shown how this model can use optimization algorithms to minimize the loss function, for different AHI model configurations. Section 6 contains the final version of the AHI simulation model before it is put into operation. Section 6 is reserved to Results of some case studies and their discussion. The paper finished with the conclusions obtained, future research lines and the list of references that were consulted.

### 3. AHI modelling methodology

The application procedure for calculating the health index (Crespo Márquez et al., 2020), is based on 5 consecutive steps, in which, starting from a design life associated with an equipment's category, a current health index is reached. For this, a series of factors related to the location, operation and condition of the asset are considered. It is presented in the following Fig. 2, the model, with the 5 steps for calculating the health index of an asset. For a precise description of the methodology and formulation of the AHI the reader is addressed to (Serra et al., 2019).

A synthesis of formulation is as follows: The provider defines a design theoretical life for every asset depending on the equipment category. Once identified manufacturing/built data, model and technical design specifications of an asset, its design life can be adapted by the owner according to accumulated experience and the information provided by different manufacturers and builders. This estimated owner life will be considered for accounting purposes and to measure asset depreciation and asset book value over time. The estimated owner life can then be adjusted according to the characteristics of the asset location and loading.

$$\text{Estimated life} = \frac{\text{Design life (books)}}{F_{FL} \cdot F_{EL}} \quad (1)$$

Where:

$F_{FL}$ : Combined functional location factor.

$F_{EL}$ : Expected Load factor.

The load factor ( $F_{EL}$ ), as well as the location factor ( $F_{FL}$ ), is inherent in the functional location of the asset.

The Combined functional location factor ( $F_{FL}$ ) is based on the impact of the asset functional location on its operation and maintenance. The specific location factors considered are proposed by GB DNO groups methodology (GB DNO groups, 2017) and must be adapted depending on the specific industry and on the specific asset (De la Fuente et al., 2021b).

With:

$$F_{FL} = \max(F_{DC}, F_A, F_T, F_{AT}, F_{PS}) \quad (2)$$

And

$F_{DC}$ : Distance to the coast factor.

$F_A$ : Altitude above sea level factor.

$F_T$ : Annual average of outside temperature factor.

$F_{AT}$ : Exposure to corrosive atmosphere factor.

$F_{PS}$ : Exposure to dust in suspension factor.

The load factor ( $F_{EL}$ ) measures the load request that is made on the asset in that location, in front of the maximum admissible load. Normally, this data is provided when the asset is commissioned, and it is part of the technical specifications of the asset. In general, the following equation is used:

$$F_{EL} = \frac{\text{Load under normal operating conditions}}{\text{Maximum permissible load}} \quad (3)$$

A fundamental hypothesis of the methodology is that the irreversible degradation of an asset follows an exponential behaviour with respect to its age, and in step number 3, the aging rate ( $\beta$ ) of the asset is determined by the natural logarithm of the quotient between the asset health index when new ( $H_{new}$ ) and the asset health index when reaching its expected life ( $H_{estimated\ life}$ ). The equation for its calculation is the following:

$$\beta = \frac{\ln \frac{H_{new}}{H_{estimated\ life}}}{\text{Estimated life}} \quad (4)$$

With:

*Estimated life*: Time calculated in (1).

$H_{new}$ : Health index for a new asset;

$H_{estimated\ life}$ : Health index for the asset expected life time;

The health index (HI) is considered as a dimensionless number between 0.5 and 10, with an exponential behaviour with respect to the age "t" of the asset, which is characterized by the aging rate as follows:

$$HI_t = HI_{new} \cdot e^{\beta \cdot t} \quad (5)$$

Where  $HI_t$  is defined in step 4 of the methodology as the initial health index of the asset. The methodology (in (GB DNO groups, 2017)) ends in step 5, estimating the actual health index of the asset -  $AHI_t$  -, using health and reliability modifiers, as follows:

$$AHI_t = HI_t \cdot HM_t \cdot RM_t \quad (6)$$

Where,

$HI$ : Initial health index.

$HM$ : Health modifier.

$RM$ : Reliability modifier.

In the GB DNO model, the equations to obtain the value of the health modifier (MS) and the reliability modifier (MF) are the following:

$$HM_t = \prod_{j=1}^{j=n} HM_{j_t} \quad (7)$$

Where,

$j = 1 \dots n$ : index used for different health modifiers,

$MS_{j_t}$ : health modifier j at a given age.

$$RM_t = \prod_{k=1}^{k=m} RM_{k_t} \quad (8)$$

Where,

$k = 1 \dots m$ : index used for different reliability modifiers,

$MF_{k_t}$ : reliability modifier k at a given age.

MS and MF will take values within ranges to be calibrated according to the impact of each single modifier for the health of a given class of asset. This point will be discussed later in the dynamic simulation model Section. Finally, the actual health index of a system can be obtained and represented as in Fig. 3, where each asset conforming the system may have a different degradation speed.

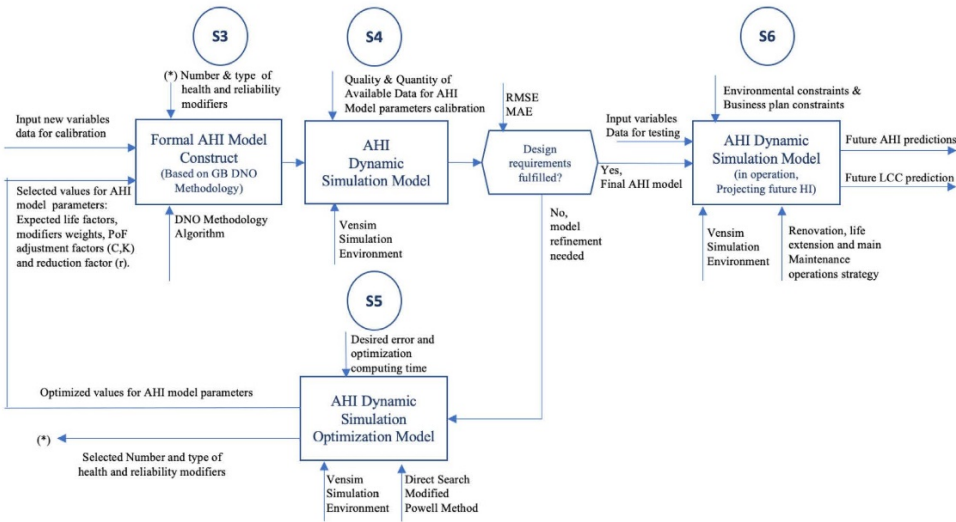


Fig. 1. IDEF Diagram of the process followed, indicating the Sections of the paper in circles.

Asset initial condition can be restored after major maintenance intervention or assets renovations or replacement.

Table 1 provides a simple interpretation for an AHJ, in this example and for an asset with a normal life expected of 50 years, recommendations for action are adjusted.

A more elaborated interpretation of the AHJ can be given linking the AHJ value to a probability of failure (PoF) of the asset. The methodology formulates this relationship using the first three terms of the Taylor series for the exponential function as follows (GB DNO groups, 2017):

$$PoF_t = K \cdot \left[ 1 + (C \cdot H_t) + \frac{(C \cdot H_t)^2}{2!} + \frac{(C \cdot H_t)^3}{3!} \right] \quad (9)$$

Where:

C: Constant value, equal for all assets, (in GB DNO groups, 2017) C value is selected such that the PoF for AHJ = 10 is ten times higher than the PoF of a new element;

K: Constant value to be calibrated, considering asset observed failure frequency per annum, the AHJ distribution of asset population and the volume of assets within the population.

$H_t$ : Equals  $AHJ_t$  when  $AHJ_t \geq 4$ ,  $H_t = 4$  otherwise.

The methodology states that the reason for this formulation is that "... this implementation is able to describe a situation where the probability of failure rises more rapidly as asset health degrades (common in literature), but at a more controlled rate than a full exponential function would describe". C defines the shape of the curve, K scales the PoF to a failure rate, and  $H_t$  limits the transition from constant PoF to an exponential relationship. Finally, the method suggests that the health index can be projected into the future (Future Health Index -  $FHI_t$ ), departing from a given age ( $t_0$ ). The methodology proposes to do this evaluating a corrected aging rate ( $\beta c$ ) of the asset in the following way:

$$\beta c = \frac{\ln \frac{AHJ_{t_0}}{AHJ_{new}}}{t_0} \quad (10)$$

$$FHI_t = HI_{new} \cdot e^{\beta c \cdot t} \quad (11)$$

With  $t \geq t_0$ , when projection is made, and  $\beta c \leq 2 \cdot \beta$  (according to (GB DNO groups, 2017)). At this point the method presents some limitation when maintaining that for high values of  $FHI_t$ , the recommendation is to introduce a reduction factor in this formulation, and Eq. (11) would be transformed into Eq. (12)

$$FHI_t = AHJ_t \cdot e^{\beta c \cdot t} \quad (12)$$

With r: reduction factor, that in the DNO methodology is defined as

$$r = \begin{cases} 1 & \text{for } AHJ_t < 2 \\ 1 + (AHJ_t - 2) \cdot (0.5/3.5) & \text{for } 2 \leq AHJ_t \leq 5.5 \\ 1.5 & \text{for } AHJ_t > 5.5 \end{cases} \quad (13)$$

## 4. Dynamic simulation modelling methodology

### 4.1. The AHJ continuous time simulation model

In this Section a continuous simulation model of the previous AHJ loosely based on the OFGEM Network Asset Indices Methodology is presented. This model translates equations in Section 3 to the language of simulation, adding interesting dynamic features that can now be considered, improving flexibility in future model utilization. The dynamic simulation model that will now be presented can be characterized as follows:

- It is a non linear model because of the nature of the AHJ.
- The model will be formalized in difference equations
- The simulation time will advance at constant time intervals and the final time will depend on the purpose of the analysis to carry out.
- The model formulation can be used regardless the software package selected for its computer implementation, i.e. Although diagrams use in Fig. 4 are Vensim diagrams, maths can be implemented in any dynamic simulation package in the market.

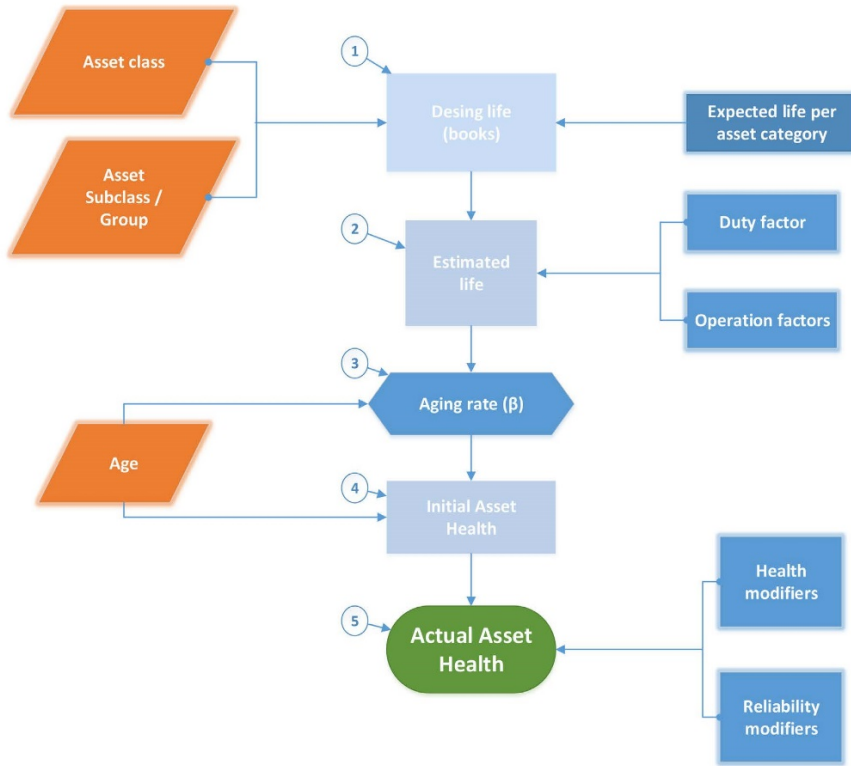


Fig. 2. Procedure to calculate the AHL.

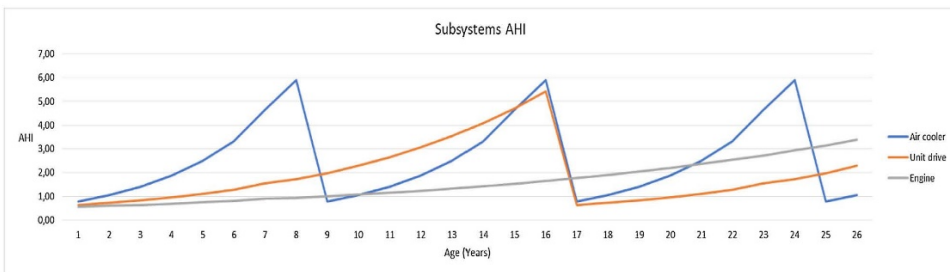


Fig. 3. Health index for different assets of a system (one colour per asset).

In the following sub sections, first the Stock and Flow Diagram (SFD) will be shown, and then the notation of the variables included in the model will be presented. Finally, the simulation model formal equations will be listed.

#### 4.2. Simulation time versus age of the asset

In Section 3 the health index is calculated for a given age of the asset in Eqs. (5) and (6). For most of static assets (containers,

tanks, exchangers, poles, structures, etc.), the age of the asset simply changes according to the course of time, which can be matched with the simulation time ( $t$ ). However, for many dynamic assets (pumps, compressors, blowers, etc.), the course of time is replaced by the accumulation of operating time (AOT) as a more suitable indicator of age. The rationale for that is that operation ages these assets much more than the passage of time and therefore offers a better reference to measure and compare the health of the asset. In fact, most of major maintenance activities in dynamic assets are

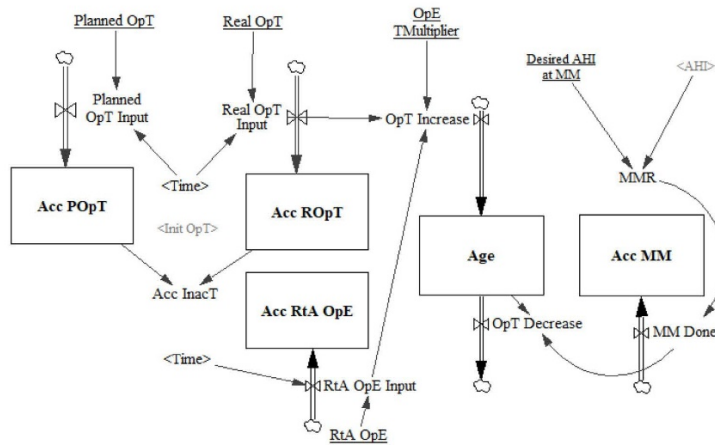


Fig. 4. SFD of an asset's age dynamic model.

associated, beside other factors, to operating time, not to calendar times. Therefore, age and simulation time will be, in general, decoupled. In fact, age will be another variable to model, according to each specific scenario. This offers the possibility of:

- Advancing the age of the asset according to specific events that may take place in its operation and/or maintenance:
  - Thus, for example, many manufacturers make an equivalence between "to start/to stop an equipment" with the consumption of a certain number of operating hours.
  - It is also possible to model consumption of certain hours of operation after each major maintenance (assuming that after the repair the equipment is not as good as new, i.e. is older).
- Measuring the real operating time of an asset compared to its expected operating time. Long times of inactivity can become an indicator of potential increase in the probability of failure.
- Replacing a desired age with a desired health when controlling the schedule of maintenance major interventions along the asset's life cycle.

Therefore, the challenge here is combining appropriately the modelling of age with the modelling of health, especially when the GB DNO groups methodology is, at least, loosely adopted. To that end, in Fig. 4 a stock and flow diagram (SFD) of the modeling of age is presented. The reader may notice that the model accumulates in stock variables:

- The number of operating hours since the last major maintenance;
- The total number of real and expected operating hours;
- The number of relevant-to-age operational events;
- The number of major maintenances (that could be relevant to age).

This offers the analyst different opportunities to control age according to most relevant assets operational and maintenance age-related events. This will be easy to model *how old the equipment is* (age) since its last renovation or overhaul, which is required to determine later *how is it irreversibly deteriorated* (health).

### 4.3. Static versus dynamic aging factor

In the GB DNO groups methodology, the load factor (Fc) in Eq. (3) conditions the expected life of the asset in Eq. (1), and because of that, the expected pattern of the Health Index ( $H_i$ ) over the asset life cycle, driven by the aging factor in Eq. (4). However, in general, the load factor of an asset may change over time, and in the same way, it can change its life expectancy and aging rate. A dynamic model of the asset health index should take this into account and allow life expectancy to be modified dynamically when changes in the load factor are noticed. The dynamic model in this paper considers now  $\beta$  as a model variable  $\beta_t$ .

For different purposes, capturing the differences in aging factor (expected versus real) over time, can be very interesting. For instances, changes in asset load can alter significantly the business plan, by introducing new capex schedules. Fig. 5 presents the SFD of these calculations (notice that all variables in this Figure are modeled as auxiliary variables in the dynamic simulation model).

### 4.4. Modeling AHI. An irreversible dynamic index of degradation

The health of an asset measures its irreversible deterioration or degradation; therefore, the index must be monotonically increasing. A decrease in the index must be only due to a renovation or major maintenance of the asset. In order to model that, Fig. 5 SFD presents AHI as a stock or level variable, that can only increase in value when the calculated Dynamic AHI (considering all possible effects: modifiers and factors) exceeds the value of the AHI stored. AHI will decrease in value when the major overhaul is accomplished (MMR).

In Fig. 5 SFD, it is also modeled the Age of the system when the last major maintenance is accomplished (*Age at MM<sub>t</sub>*). Notice that to hold this information over time, dynamically, a stock variable is used.

In the equations of the dynamic simulation model, the formulations of the health index, health and reliability modifiers will differ substantially from the one used in (GB DNO groups, 2017) (Eqs. (6)–(8)) and an exponential proportional model is now proposed (as in (Márquez et al., 2013)). This requires *HM Input Table* and *RM Input Tables* to be normalized, playing the role of covariates, and the utilization of covariates coefficients *HM Coef* and *RM Coef*.

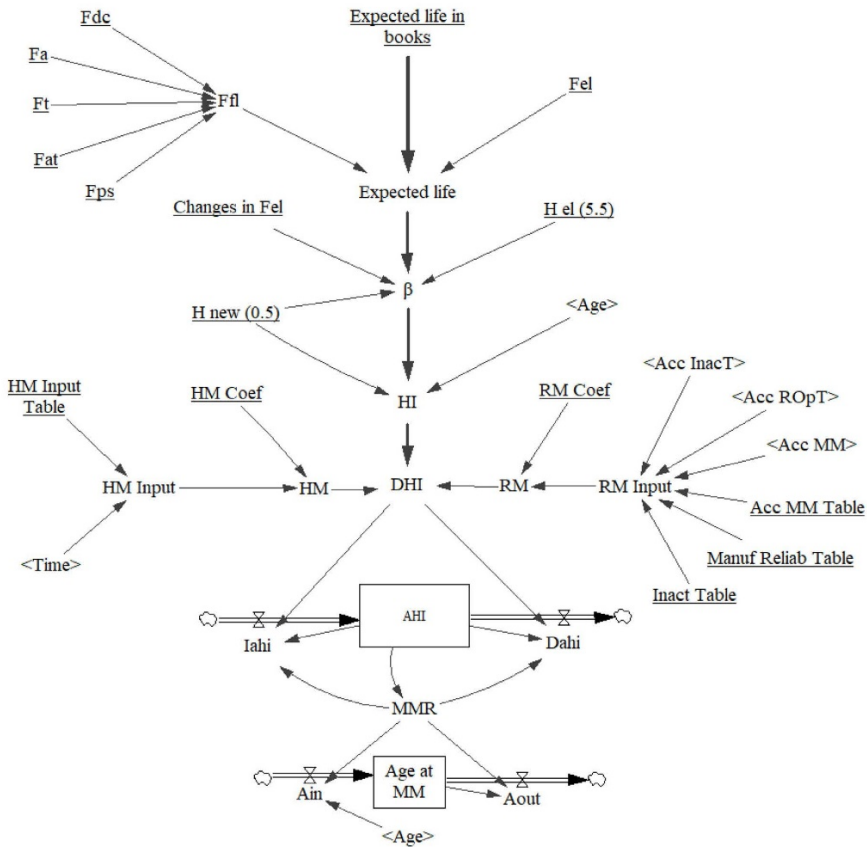


Fig. 5. SFD of an asset's Health Index dynamic model.

**Table 1**  
Asset Health index and expected lifetime.

AHI	Condition	Expected Lifetime	Requirements
0.5–4	Very good	More than 15 years	Normal maintenance
4–5.5	Good	More than 10 years	Normal maintenance
5.5–7	Fair	From 3 to 10 years	Increase diagnostic testing, possible replacement depending on criticality
7–8	Poor	Less than 3 years	Start planning process to replace
8–10	Very poor	Near to the end of life	Immediately assess risk; replace or rebuild based on assessment

4.5. Linking AHI to probability of failure. Assessing OPEX and CAPEX

Once modeled AHI as a stock variable, operational expenditure (OpEx) and capital expenditure (CapEx) per periods can be modeled. To that end, it is needed:

- To obtain the failure rate as a function of C, K and r values, as in Eq. (5), parameters that will be calibrated by the software, as described later. This is needed to estimate the OpEx, by multiplying failure rate by the average corrective maintenance cost of a failure, and then adding an estimated PM cost.

- To determine whether there is a need of a major maintenance intervention according to the maximum asset health allowance policy.

Notice that the OpEx and CapEx variables are considered as financial flow variables in the dynamic model (See Fig. 6), these flows are accumulated in stock financial variables: Accumulated OpEx and Accumulated CapEx, respectively. Adding these two accumulations we obtain the total expenditure in the asset (TotEx), over the entire simulation period. Error variables for the OpEx and CapEx time series estimations are generated for the purpose of subsequent parameter calibration before putting the model into operation. In order to do so, financial records over a long time are necessary,

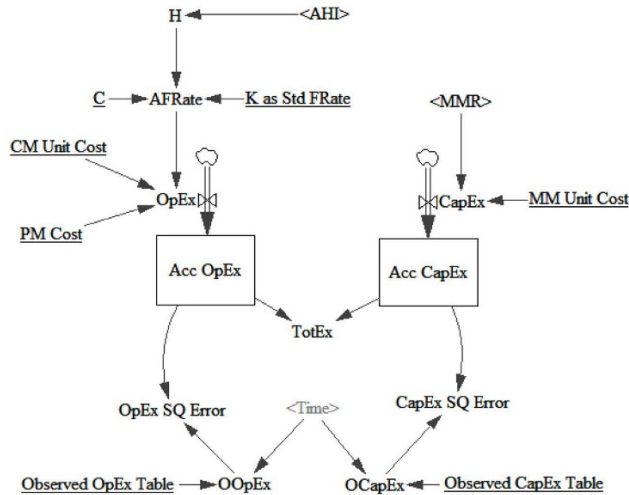


Fig. 6. SFD of an asset's TotEx and financial predictions errors in the model.

which is many times a bottleneck of this process, as a consequence of an incomplete asset's expenses registration in many companies and organizations.

The reader can notice how the diagrams in previous three figures focus on model structure, and will remain the same regardless of complexity of the model due to the number of assets, health and reliability modifiers. Since variables are subscripted vectors this complexity is transparent in the diagram.

#### 4.6. Notation of the variables

The notation that we will use together with the indication of the typology of the variable used in previous four figures, are as follows:

##### 4.6.1. Constants, parameters and input tables

- $Fdc(i)$  = Distance to the coast factor.
- $Fa(i)$  = Altitude above sea level factor.
- $Ft(i)$  = Annual average of outside temperature factor.
- $Fat(i)$  = Exposure to corrosive atmosphere factor.
- $Fps(i)$  = Exposure to dust in suspension factor.
- $Ffl(i)$  = Compined functional location factor.
- $Fel(i)$  = Expected load factor in selected functional location.
- Expected Life in books  $(i)$  = Expected Life of asset  $i$  in books.
- Expected Life  $(i)$  = Expected Life of asset  $i$ .
- $OpEMultiplier(i)$  = Operational event time multiplier.
- Changes in  $Fel(i)_t$  = Changes in load factor of the asset at interval  $t$ .
- $Hel$  = Health index at the expected life of an asset (5.5).
- $Hnew$  = Health index when an asset is new (0.5).
- $HM Coef(j)$  = Coefficient of contrinution of Health Modifier  $j$ .
- $RM Coef(k)$  = Coefficient of contrinution of Reliability Modifier  $k$ .
- $HM Input Table(i, j)(x)$  = Table with changes in the H modifier value  $j$  over time
- $RM Input Table(i, k)(y)$  = Table with changes in the K modifier value  $k$
- $Real OpT(i)_t$  = Table with real operational time of the asset  $i$  at interval  $t$ .
- $Planned OpT(i)_t$  = Table with planned operational time of the asset  $i$  at interval  $t$ .

$RtA OpE(i)_t$  = Table with relevant to age oper events of the asset  $i$  at interval  $t$ .

$Desired AHI$  at  $MM(i)$  = Desired health of the asset  $i$  to do the major maintenance

$Desired Age$  at  $MM(i)$  = Desired age of the asset  $i$  to do the major maintenance

$Observed OpEx Table(i)_t$  = Table with observed OpEx of asset  $i$  over time

$Observed CapEx Table(i)_t$  = Table with observed CapEx of asset  $i$  over time

$CM Unit Cost(i)$  = Average unit cost per corrective maintenance for asset  $i$ .

$PM Cost(i)$  = Average preventive maintenance cost per time of asset  $i$ .

$MM Unit Cost(i)$  = Average unit cost per major maintenance for asset  $i$ .

With:  $i = 1 \dots n$  assets;  $j = 1 \dots m$  health modifiers;  $k = 1 \dots r$  reliability modifiers

##### 4.6.2. Auxiliary variables

- $\beta(i)_t$  = Aging rate of asset  $i$  at interval  $t$ .
- $HI(i)_t$  = Initial Health Index of asset  $i$  at interval  $t$ .
- $Hle(i)_t$  = Initial Health Index of asset  $i$  with constant initial load factor at interval  $t$ .
- $DAHI(i)_t$  = Dynamic Health Index of asset  $i$  at interval  $t$ .
- $MMR(i)_t$  = Request of Major Maintenance in asset  $i$  at interval  $t$ .
- $HM Input(i, j)_t$  = Input of health modifier  $j$  for asset  $i$  at interval  $t$ .
- $RM Input(i, k)_t$  = Input of reliability modifier  $k$  for asset  $i$  at interval  $t$ .
- $Acc Inact(i)_t$  = Accumulated Inactivity Time of asset  $i$  at time  $t$ .
- $OpEx(i)_t$  = Operational Expenditure on asset  $i$  at interval  $t$
- $CapEx(i)_t$  = Capital Expenditure on asset  $i$  at interval  $t$
- $OOpEx(i)_t$  = Observed Operational Expenditure on asset  $i$  at interval  $t$
- $OCapEx(i)_t$  = Observed Capital Expenditure on asset  $i$  at interval  $t$
- $TotEx(i)_t$  = Total Expenditure on asset  $i$  at interval  $t$
- $H(i)_t$  = H value for asset  $i$  at time interval  $t$
- $OpEx SQ Error(i)_t$  = Quadratic error of OpEx values for asset  $i$  at time interval  $t$

CapExSQ Error ( $i$ )<sub>t</sub> = Quadratic error of CapEx values for asset  $i$  at time interval  $t$   
 AFRate ( $i$ )<sub>t</sub> = Actual Failure Rate of asset  $i$  at interval  $t$

4.6.3. Stock variables

Age ( $i$ )<sub>t</sub> = Age of asset  $i$  at time  $t$ .  
 AHI ( $i$ )<sub>t</sub> = Actual Asset  $i$  Health Index at time  $t$ .  
 Acc POPT ( $i$ )<sub>t</sub> = Accumulated Planned Operational Time of asset  $i$  at time  $t$ .  
 Acc ROPt ( $i$ )<sub>t</sub> = Accumulated Real Operational Time of asset  $i$  at time  $t$ .  
 Acc MM ( $i$ )<sub>t</sub> = Accumulated number of Major MAintenance in asset  $i$  at time  $t$ .  
 Acc Rta OpE ( $i$ )<sub>t</sub> = Accumulated number of Rta Op Events in asset  $i$  at time  $t$ .  
 Age at MM ( $i$ )<sub>t</sub> = Age of the asset  $i$  at the time of its last major maintenance at time  $t$ .

4.6.4. Flow variables

Iahi ( $i$ )<sub>t</sub> = Increase in Actual Asset  $i$  Health Index at interval  $t$ .  
 Dahi ( $i$ )<sub>t</sub> = Decrease in Actual Asset  $i$  Health Index at interval  $t$ .  
 Planned OpT Input ( $i$ )<sub>t</sub> = Increase in planned operational time for asset  $i$  at interval  $t$ .  
 Real OpT Input ( $i$ )<sub>t</sub> = Increase in real operational time for asset  $i$  at interval  $t$ .  
 Rta OpE Input ( $i$ )<sub>t</sub> = Relevant to age operational event for asset  $i$  at interval  $t$ .  
 OpT Increase ( $i$ )<sub>t</sub> = Increase of operational time of asset  $i$  at interval  $t$ .  
 OpT Decrease ( $i$ )<sub>t</sub> = Decrease of operational time of asset  $i$  at interval  $t$ .  
 MM Done ( $i$ )<sub>t</sub> = Major Maintenance Done in asset  $i$  at interval  $t$ .  
 Ain ( $i$ )<sub>t</sub> = Age at MM increase in asset  $i$  at time interval  $t$ .  
 Aout ( $i$ )<sub>t</sub> = Age at MM decrease in asset  $i$  at time interval  $t$ .

4.7. Equations

The equation for each one of the above declared variables are now presented:

4.7.1. Constants & Parameters

- Fdc ( $i$ ) = Fdc <sub>$i$</sub> , Data (14)
- Fa ( $i$ ) = Fa <sub>$i$</sub> , Data (15)
- Ft ( $i$ ) = Ft <sub>$i$</sub> , Data (16)
- Fat ( $i$ ) = Fat <sub>$i$</sub> , Data (17)
- Fps ( $i$ ) = Fps <sub>$i$</sub> , Data (18)
- Fel ( $i$ ) = Fel <sub>$i$</sub> , Data (19)
- F<sub>FL</sub> = max(Fdc <sub>$i$</sub> , Fa <sub>$i$</sub> , Ft <sub>$i$</sub> , Fat <sub>$i$</sub> , Fps <sub>$i$</sub> ) (20)
- Expected Life in books ( $i$ ) = Expected Life in books <sub>$i$</sub> , Data (21)
- OpE TMultiplier ( $i$ ) = OpETM <sub>$i$</sub> , Data (20)
- Hel = 5.5 (22)
- Hnew = 0.5 (23)
- HM Coef ( $j$ ) = HMCof <sub>$j$</sub> , Data (24)
- RM Coef ( $k$ ) = RMCof <sub>$k$</sub> , Data (25)
- Desired AHI at MM ( $i$ ) = DAMM ( $i$ ), Data (26)
- Desired Age at MM ( $i$ ) = DAGMM ( $i$ ), Data (27)
- Expected life( $i$ ) = Expected Life in books <sub>$i$</sub>  / (F<sub>FL</sub> · Fel <sub>$i$</sub> ) (28)

4.7.2. Tables

- Changes in Fel ( $i$ )<sub>t</sub> = fel\_input ( $t$ ) <sub>$i$</sub> , Data table (29)
- Real OpT ( $i$ )<sub>t</sub> = RealOpT( $t$ ) <sub>$i$</sub> , Data table (30)
- Planned OpT ( $i$ )<sub>t</sub> = PlaOpT ( $t$ ) <sub>$i$</sub> , Data table (31)
- Rta OpE ( $i$ )<sub>t</sub> = RtaOpE ( $t$ ) <sub>$i$</sub> , Data table (32)
- HM Input Table ( $i, j$ )( $x$ ) = Table HMIT( $i, j$ )( $x$ ) (33)
- RM Input Table ( $i, k$ )( $y$ ) = Table RMIT( $i, k$ )( $y$ ) (34)
- Observed OpEx ( $i$ )<sub>t</sub> = ObsOpEx( $t$ ) <sub>$i$</sub> , Data table (35)
- Observed CapEx ( $i$ )<sub>t</sub> = ObsCapEx( $t$ ) <sub>$i$</sub> , Data table (36)

With:  $i = 1 \dots n$  assets;  $j = 1 \dots m$  health modifiers;  $k = 1 \dots r$  reliability modifiers

4.7.3. Auxiliary variables

- $\beta$  ( $i$ )<sub>t</sub> = ln( $\frac{H_{new}}{H_{el}}$ ) / ( $\frac{\text{Expected life}(i)}{\text{Changes in Fel}(i)_t}$ ) (37)
- HI ( $i$ )<sub>t</sub> = H<sub>new</sub> · e <sup>$\beta(i)_t$</sup>  · Age( $i$ )<sub>t</sub> (38)
- DHI ( $i$ )<sub>t</sub> = HI( $i$ )<sub>t</sub> <sup>$e^{jHM(i)_t + RM(k)_t}$</sup>  (39)
- HM ( $i$ )<sub>t</sub> =  $\sum_{j=1}^{j=m}$  (HM Coef ( $j$ ) · HM Input( $i, j$ )<sub>t</sub>) (40)
- RM ( $i$ )<sub>t</sub> =  $\sum_{k=1}^{k=r}$  (RM Coef ( $k$ ) · RM Input( $i, k$ )<sub>t</sub>) (41)
- HM Input( $i, j$ )<sub>t</sub> = HM Input Table ( $i, j$ )( $t$ ) (42)

The equation for the RM Input could be formulated as the one for the HM Input, as

$$HM \text{ Input}(i, k)_t = RM \text{ Input Table}(i, k)(t) \tag{43}$$

However, in the case of this paper's model, some of the reliability modifiers are dynamically calculated in other auxiliary and stock variables of the model in the following way:

$$RM \text{ Input}(i, Inactivity)_t = RM \text{ Input Table}(i, Inactivity)(Acc \text{ InAct}(i)_t) \tag{44}$$

$$RM \text{ Input}(i, MM)_t = RM \text{ Input Table}(i, MM)(Acc \text{ MM}(i)_t) \tag{45}$$

$$RM \text{ Input}(i, MR)_t = RM \text{ Input Table}(i, MR)(t) \tag{46}$$

Where in this case three reliability modifiers are considered, named: Inactivity, MM and RM. Representing: the total number of hours of inactivity of the asset, the accumulated number of major maintenances and the expected reliability of the manufacturer over time.

The strategies for major maintenance release can be formulated as in Eq. (47) or in Eq. (48):

$$MMR(i)_t = \begin{cases} 1, & \text{if } AHI(i)_t \geq \text{Desired AHI at MM}(i) \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \tag{47}$$

$$MMR(i)_t = \begin{cases} 1, & \text{if } Age(i)_t \geq \text{Desired Age at MM}(i) \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \tag{48}$$

$$TotEx(i)_t = Acc \text{ OpEx}(i)_t + Acc \text{ CapEx}(i)_t \tag{49}$$

$$H(i)_t = \begin{cases} AHI(i)_t, & \text{if } AHI(i)_t \geq 4 \\ 4, & \text{Otherwise} \end{cases} \tag{50}$$

$$Acc \text{ InAct}(i)_t = Acc \text{ POPT}(i)_t - Acc \text{ ROPt}(i)_t \tag{51}$$

$$OPeEx(i)_t = AFRate(i)_t \cdot CM \text{ Unit Cost} + PM \text{ Cost} \quad (52)$$

$$CapEx(i)_t = MMR(i)_t \cdot MM \text{ Unit Cost} \quad (53)$$

$$OOPeEx(i)_t = \text{Observed } OPeEx \text{ Table}(i)_t \quad (54)$$

$$CapEx(i)_t = \text{Observed } CapEx \text{ Table}(i)_t \quad (55)$$

$$OPeEx \text{ SQ Error}(i)_t = (OOPeEx(i)_t - Acc \text{ } OPeEx(i)_t)^2 \quad (56)$$

$$CapEx \text{ SQ Error}(i)_t = (OCapEx(i)_t - Acc \text{ } CapEx(i)_t)^2 \quad (57)$$

#### 4.7.4. Stock variables

$$Age(i)_t = Age(i)_{t-1} + OpT \text{ Increase}(i)_t - OpT \text{ Decrease}(i)_t \quad (58)$$

$$Age(i)_{t_0} = Age_0(i), \text{ Initial condition} \quad (59)$$

$$Age \text{ at } MM(i)_t = Age \text{ at } MM(i)_{t-1} + Ain(i)_t - Aout(i)_t \quad (60)$$

$$Age \text{ at } MM(i)_{t_0} = Age \text{ at } MM_0(i), \text{ Initial condition} \quad (61)$$

$$AHI(i)_t = AHI(i)_{t-1} + Iahi(i)_t - Dahi(i)_t \quad (62)$$

$$AHI(i)_{t_0} = AHI_0(i), \text{ Initial condition} \quad (63)$$

$$AccPOPOT(i)_t = AccPOPOT(i)_{t-1} + Planned \text{ } OpT \text{ Input}(i)_t \quad (64)$$

$$AccPOPOT(i)_{t_0} = AccPOP_0(i), \text{ Initial condition} \quad (65)$$

$$AccROPOT(i)_t = AccROPOT(i)_{t-1} + Real \text{ } OpT \text{ Input}(i)_t \quad (66)$$

$$AccROPOT(i)_{t_0} = AccROP_0(i), \text{ Initial condition} \quad (67)$$

$$AccMM(i)_t = AccMM(i)_{t-1} + MM \text{ Done}(i)_t \quad (68)$$

$$AccMM(i)_{t_0} = AccMM_0(i), \text{ Initial condition} \quad (69)$$

$$AccRtAOpE(i)_t = AccRtAOpE(i)_{t-1} + RtA \text{ } OpE \text{ Input}(i)_t \quad (70)$$

$$AccRtAOpE(i)_{t_0} = AccRtAOpE_0(i), \text{ Initial condition} \quad (71)$$

$$Acc \text{ } OpEx(i)_t = Acc \text{ } OpEx(i)_{t-1} + OpEx(i)_t \quad (72)$$

$$Acc \text{ } OpEx(i)_{t_0} = Acc \text{ } OpEx_0(i), \text{ Initial condition} \quad (73)$$

$$Acc \text{ } CapEx(i)_t = Acc \text{ } CapEx(i)_{t-1} + CapEx(i)_t \quad (74)$$

$$Acc \text{ } CapEx(i)_{t_0} = Acc \text{ } CapEx_0(i), \text{ Initial condition} \quad (75)$$

#### 4.7.5. Flow variables

$$Iahi(i)_t = \begin{cases} DHI(i)_t, & \text{if } AHI(i)_{t-1} < DHI(i)_t \text{ and } MMR(i)_t = 0 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (76)$$

$$Dahi(i)_t = \begin{cases} AHI(i)_t, & \text{if } AHI(i)_{t-1} < DHI(i)_t \text{ and } MMR(i)_t = 0 \\ AHI(i)_t - Hnew, & \text{if } AHI(i)_{t-1} < DHI(i)_t \text{ and } MMR(i)_t = 1 \\ AHI(i)_t, & \text{if } AHI(i)_{t-1} < DHI(i)_t \text{ and } MMR(i)_t = 0 \end{cases} \quad (77)$$

$$Planned \text{ } OpT \text{ Input}(i)_t = Planned \text{ } OpT(i)_t \quad (78)$$

$$Real \text{ } OpT \text{ Input}(i)_t = Real \text{ } OpT(i)_t \quad (79)$$

$$RtA \text{ } OpE \text{ Input}(i)_t = RtA \text{ } OpE(i)_t \quad (80)$$

$$OpT \text{ Increase}(i)_t = RtA \text{ } OpE(i)_t \cdot OpE \text{ } TMultiplier(i) + Real \text{ } OpT \text{ Input}(i)_t \quad (81)$$

$$OpT \text{ Decrease}(i)_t = \begin{cases} Age(i)_{t-1}, & \text{if } MM \text{ Done}(i)_t = 1 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (82)$$

$$MM \text{ Done}(i)_t = \begin{cases} 1, & \text{if } MMR(i)_t = 1 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (83)$$

$$Ain(i)_t = \begin{cases} Age(i)_{t-1}, & \text{if } MMR(i)_t = 1 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (84)$$

$$Aout(i)_t = \begin{cases} Age \text{ at } MM(i)_{t-1}, & \text{if } MMR(i)_t = 1 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (85)$$

### 5. Implementation in Vensim and optimization model

Vensim provides high rigour for writing model equations, helps to trace and to understand the importance of model existing feedback loops and supports multiparametric optimisation that will result essential for this work (García, 2018). The reader can find all our Vensim language equations of the model in previous Figures in Appendix A to this paper. In those equations the reader can verify that:

- Several variables are subscripted and that allows to introduce new subscript elements (for instance new assets, new modifiers, etc).
- Most of Data inputs (values of factors, table for operating hrs, modifiers, etc.) and observed data (values of OpEx and CapEx series) are imported from Excel (the reader should review Vensim Manuals to understand de input data set up in Excel, to be uploaded automatically to Vensim).
- The model will need separate runs to: calibrate parameters and to project future result of desired scenarios.

When calibrating parameters, the following considerations are made:

- The value for the factors to adjust the expected life of the asset are constant along the simulation period (Ffl & Fel). The range of variation to measure the impact of functional location and load is directly taken from the GB DNO document, where these values are general for a vast number of asset classes. In this work it is considered that relative ranges used for of each one of the factors are robust, can be now utilized and they will not be considered in the calibration.
- The range of variation and the possible impact of each health and reliability modifier, despite the fact that can be guessed by the experts in the asset (technologists), will be then calibrated. This relative impact of each one of the modifiers is defined in the values  $HM \text{ Coef}(j)$  and  $RM \text{ Coef}(k)$  in the model.
- Regarding the link between AHI and the asset failure rate. K is considered a standard failure rate for the asset in good health, therefore it is known and does not need calibration, and C is a constant that can be computed to fulfill that, in the worst possible asset condition ( $AHI = 10$ ), the failure rate is 10 times higher than the failure rate for the asset as new. So, k & C are not considered for calibration.

The process relies on tools provided by Vensim for optimization and calibration of model parameters. Vensim uses the direct-search method that does not evaluate the gradient (Powell Modified Method), to calibrate model parameters (Powell, 2021; Powell, 1968). The optimization model implemented in the Vensim Powell Optimizer is as follows:

Objective Function:

$$\text{Min} \sum_t \sum_i OPeEx \text{ SQ Error}(i)_t + CapEx \text{ SQ Error}(i)_t$$

with  $t = 1 \dots \text{Final Simulation Time}$  and with  $i = 1 \dots n$  assets.

Subject to:

$$0 \leq HM \text{ Coef}(j) \leq 1 \text{ with } j = 1 \dots m \text{ health modifiers}$$



$0 \leq RM \text{ Coef}(k) \leq 1$  with  $k = 1 \dots r$  reliability modifiers

Notice that the impact of the modifiers can never improve the existing equipment irreversible degradation, at a certain time. This is why the lower limit for the two calibrated parameters is 0. Also, the higher limit of these parameters could be selected according to the failure rates observed in the plant, but under reasonable condition will never exceed 2. Finally, the analyst can select to stop the algorithm according to a maximum number of iterations or according to a certain tolerance criterion for the solution (in Vensim).

## 6. Model version to put into operation for TotEx projection

In order to build the final version of the model to project assets expenses and investments the analyst must proceed as follows:

- To identify the values for the parameters: *HM Coef* ( $j$ ) and *RM Coef* ( $k$ ), providing a better fit, as a result of the calibration.
- To compute the final value of the asset  $AHI_t$  at the end of the model calibration period ( $t_0$ ).
- To estimate the value of the constant aging rate for the projection  $\beta c$ , as in Eq. (10), where  $t_0$  is the final time of the calibration period.

$$\beta c = \frac{\ln \frac{AHI_{t_0}}{AHI_{new}}}{t_0} \quad (10)$$

- To gather information about expected operating hours and load: These are input tables *Planned OpT*( $t$ ) and *Changes in Fel*( $t$ ).
- Run the model with the corrected aging rate ( $\beta c$ ) assuming no *RM* nor *HM* impact. This means assuming a similar average impact of modifiers over the projected period.

When this is done, the final model version to put into operations can be written, and simulations with it can be made, testing available data, to project *AHI* and *TotEx* for the asset over the expected life cycle. In Fig. 7, structure modifications to be made using this model, compared to the calibration phase one, is presented.

## 7. Model results and sample industrial application

In order to show versatility of the tools, different sample results will be provided. Sample results have to do with the selection of model structure, and with the utilization of the model in real life cases for projection of maintenance cost and capital investments in assets. To illustrate this potential application, in the next paragraph two possible major maintenance release control policies will be modelled and analysed (sometimes these control policies are names MMR strategies): MMR age-based control policy and MMR *AHI*-based control policy.

### 7.1. Comparing age based vs. *AHI* based equipment MM control

Understanding the relationship between assets age, degradation and renovation is very important. At present, most capitalized industrial and infrastructure assets follow a process of restoration and renovation which is based on age. There is a desired age established for major maintenance or replacement activities and these activities are carried out when reaching this set point and financial resources are available (see feedback loop “-1”). For these cases (strategy 1: MMR age-based strategy) the asset’s health is not included in the scheduling decision-making process (see Fig. 8).

A different approach (strategy 2: *AHI*-based strategy) tries to avoid situations of too early or too late equipment MM/renovation when scheduling these activities based on age only (see Fig. 9).

The idea is the consideration of factors related to the functional location of the equipment and to their operational and maintenance

history. Gaining this information and considering it in decision making scheduling MM/renovation intervention based on a certain desirable *AHI* limit adds a new feedback loop to assets life cycle control (loop -2). This new loop adds the impact of a changes in load through the aging factor  $\beta$ , and the impact of operational and maintenance records through the health and reliability modifiers (*HM* and *RM*). Some of the reliability modifiers may add new dynamics to the problem, see for instance the effect of MM accumulation in a certain asset (loop +1 in Fig. 9). The greater number of major maintenances accumulated the more accelerated degradation. This accelerates the degradation process and shortens the time to the next overhaul since desired *AHI* limit will be reached earlier.

### 7.2. Testing different model structures with a simple initial example

Strategies in 7.1 are now modelled. The idea is to simulate behaviour of the asset (asset name GA 101 A in this example) under both MM Released control strategies, named now “Age base (15,000 h)” and “*AHI* Based (5.5)” in Figs. 10 and 11. These Figures show  $AHI_t$  and Age at  $MM_t$ . The idea is the reader to appreciate the difference in these fundamental variables under both strategies, In Fig. 10 *AHI* curve is always under 6 units while in Fig. 11, *AHI* reaches its maximum possible value (= 10) because MM is not released despite the fact that  $AHI_t \geq 5.5$ .

Both graphs have a different scale for each variable. In Fig. 12, however, same scale is maintained to show  $AHI_t$  under both strategies, compared with the original Health Index without the effect of the Modifiers. Fig. 13 shows the corresponding failure rate.

Fig. 14 shows the difference in accumulated overhauls over time, resulting under both circumstances, leading to different Capex, Opex and Totex.

In the next Section these different MMR control policies or strategies are applied to a complete plant analysis including a set of 54 assets of different types. Overall results are presented and analyzed.

### 7.3. Developing an industrial case for application

#### 7.3.1. Introduction

The model has been used to develop a plan for capital investment (CapEx), operations and maintenance (OpEx) Expenditure to support the associated strategic decision-making processes in a Company (Regasification Terminal) for the period 2019–2035. The goal was using the model to develop a profile of expected expenses associated with a total of 54 assets of a Regasification Terminal (the Company). The company decided to follow the approach established in the guides prepared for this purpose by the Institute of Assets Management (IAM) (2016). Consisting in the following steps:

- 1 Evaluation of the criticality of the Assets.
- 2 Assessment of the assets’ health, both current and projected. Obtaining the health index to the condition of the assets, in order to obtain the probability of failure of each asset until the year 2035, based on the current failure probabilities and the evolution of the health of said assets throughout the period under study.
- 3 Forecast of the evolution of costs or economic risks throughout the life cycle of the Assets under study, considering the results of the previous point and the major revisions and major maintenance planned.
- 4 Study of the different strategies for major maintenance release, again applying the methodology used in points 2 and 3 above, in order to facilitate technical-economic decision making in relation to major revisions or the Equipment renewal, with a horizon of 2019–2035.

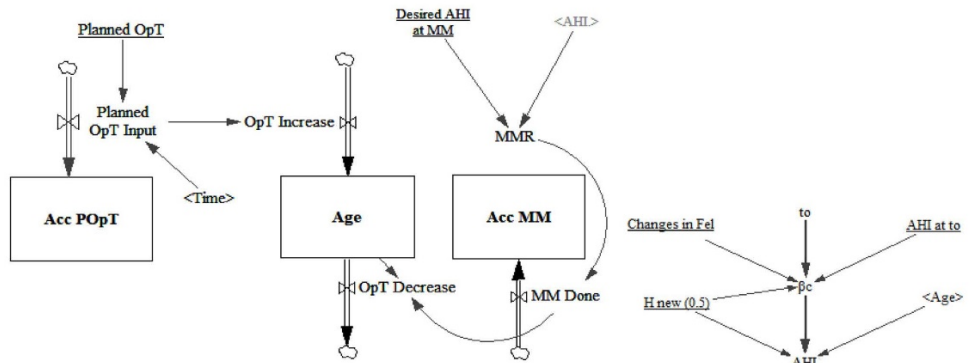


Fig. 7. Changes in the Stock and flow diagram of the model to put into operation.

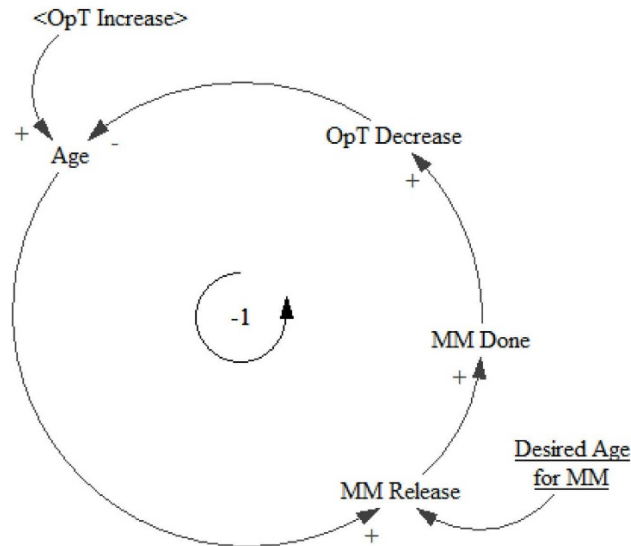


Fig. 8. Negative feedback loops in an age base MM/renovation strategy.

5 Making a better estimate, as of March 2019, of the expected expense profile for the assets, during the 2019–2035 period

For the purpose of this study, historical data recorded by the company, regarding O&M of these equipment since its commissioning (2009) has been available to the project review team.

### 7.3.2. Asset's expense profile based on the evolution of its health index

Keeping the asset's probability of failure within an acceptable range, requires preventive maintenance and major maintenance (also called *överhållsöf* the equipment). After the overhaul the asset is practically in a situation of *as new*. Therefore, it is understood that by carrying out the overhaul when the *AHI* = 5.5, the failure rates will remain under control, as expected for the established maintenance plans. If this major maintenance is postponed,

the frequency of failures will grow, and so will increase the needs for corrections and their costs, or the needs for preventive activities to retain reliability within a desired range, and their cost, decreasing efficiency in assets management.

Major maintenance activities schedules were originally recommended by the manufacturers and builders of each piece of equipment, according to functional location and operating conditions (and are often taken as generic or standard). However, after ten years of plant operation, the actual use of the asset or even its location, environmental conditions, etc., may differ from those that the manufacturer/builder had assumed in their recommendations. Of course, this may affect original failure rates considered and subsequently financial statements.

In this context, the analysis attempted to determine the multiplying factors that apply to the failure rate of each asset, due to the effect of aging (*AHI*), and the associated cost of maintenance,

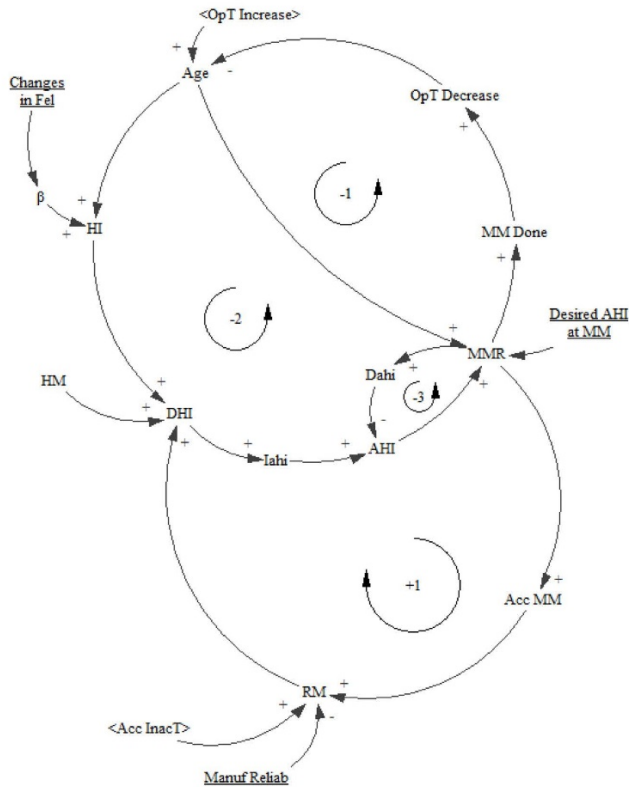


Fig. 9. Feedback loops in AHI based MM/renovation strategy.

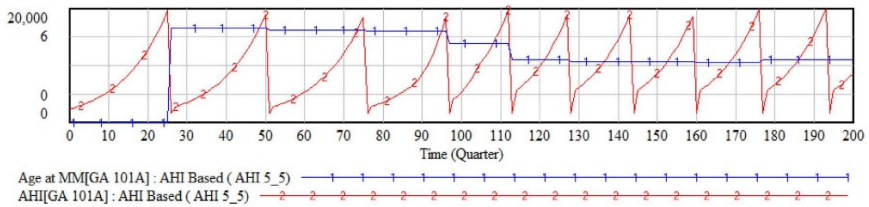


Fig. 10. AHI based MMR strategy. AHI and Age at MM variables.

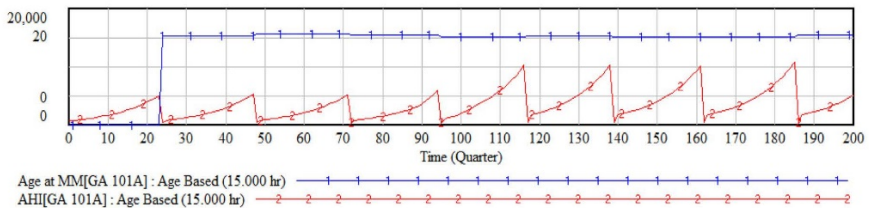


Fig. 11. Age based MMR strategy. AHI and Age at MM variables.

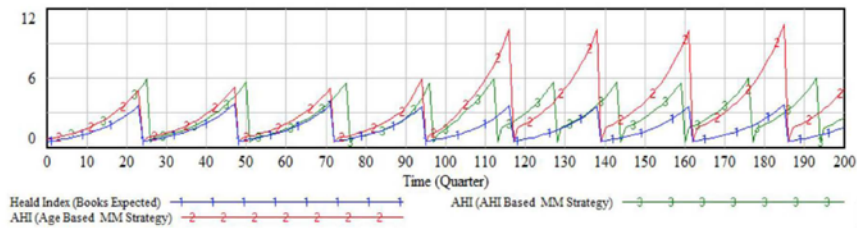


Fig. 12. Age based MMR strategy. AHI and Age at MM variables.

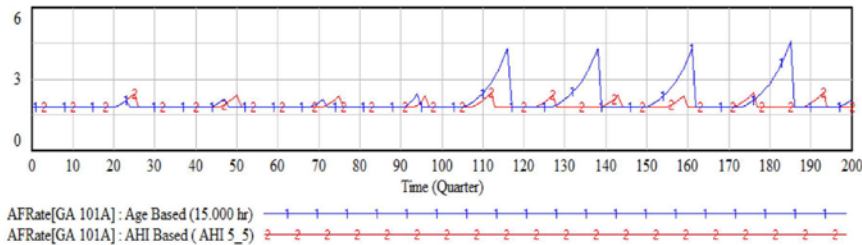


Fig. 13. Asset Failure Rate for both strategies (in failures/quarter).

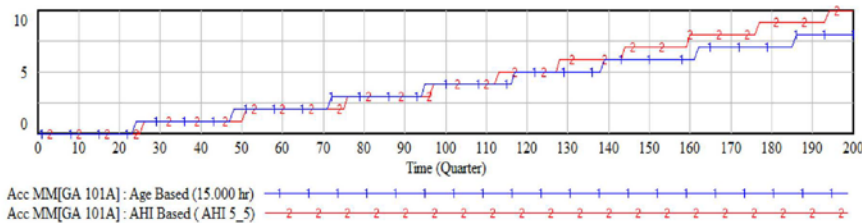


Fig. 14. Accumulated number for overhauls under both strategies.

affected by these new failure rates. On the other hand, a new strategy was proposed for major maintenance scheduling, in order to avoid out-of-control increase in the failure rates. More precisely, the strategies that were analyzed were the following:

- Strategy 1. Total expenditure on the asset (TotEx) is calculated executing its maintenance according to the manufacturer's recommendations (as in Fig. 15), without incorporating substantive changes to the original maintenance methodology (desired age-based overhauls).
- Strategy 2. TotEx is estimated assuming a standard OpEx but adjusting the overhauls schedule (CapEx) in order to maintain a controlled level of reliability (as in Fig. 16), avoiding the increase in the failure rate beyond the standard values considered (i.e. health index-based overhauls, with  $AHI \leq 5.5$ ).

In Figs. 17 & 18, after the calibration period finished at the end of 2018 (graphs are the same until that point), projection of AHI values under both strategies are presented. Assets included within the named: KO Drum system of the plant are included. AHI projections and then translated to numbers in Table 2, for two Systems KO Drum and Fender (notice that some of the systems may consist of only one asset). Once the list of expenses and investments is pro-

jected, a financial calculation is done to compare both strategies. In this calculation inflation is considered but assets depreciation is not. So, CapEx only includes expected reinvestments until the year 2035.

### 7.3.3. Industrial case results and findings

The analysis identified Strategy 2 as the most appropriate for the fulfillment of dependability targets of the terminal. This was the only one strategy to ensure assets' reliability within standard limits in this type of industry. Besides that, and curiously, Strategy 2 scored the lowest updated TotEx value (77,966 M USD). The savings in higher reliability, are higher than the extra capital investment required in number of overhauls. Results obtained for the total 54 assets are included in Table 3.

## 8. Conclusions

In this paper we have used dynamic simulation models to evaluate assets health, and to project O&M expenses and capital investments over time accordingly. Especially when operating conditions and maintenance are variable and defined by multiple system parameters, it has been shown that continuous time dynamic simulation models can help to:

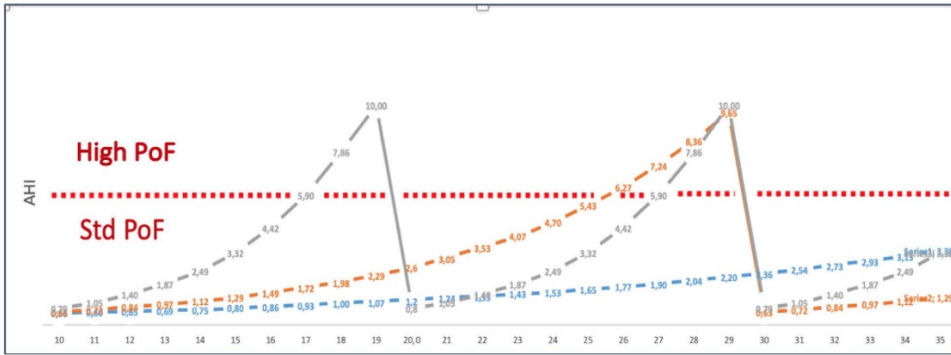


Fig. 15. Sample projection of AHI values for strategy 1.

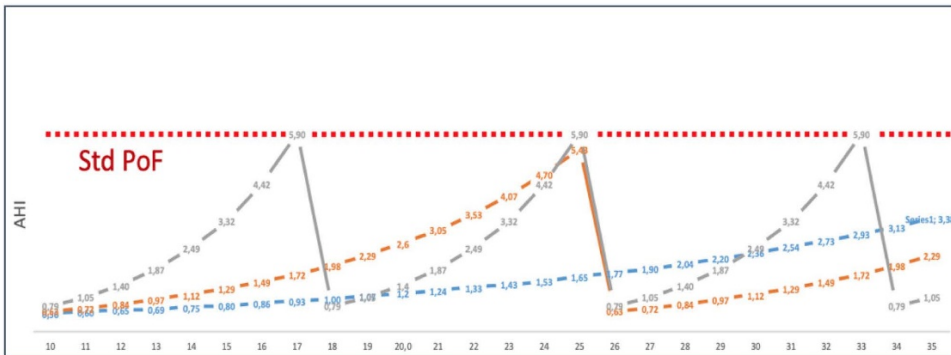


Fig. 16. Sample projection of AHI values for strategy 2.

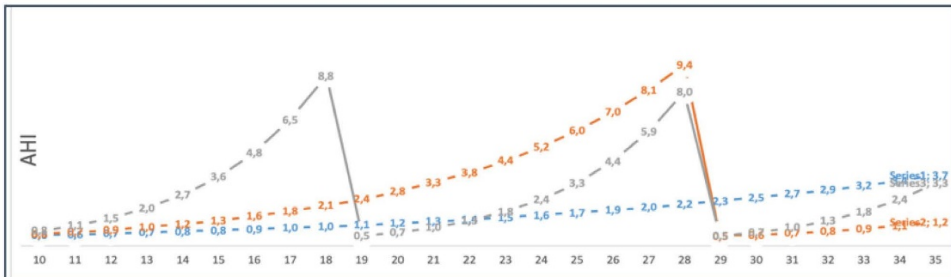


Fig. 17. Projection of AHI for Strategy 1 since 2019 and until 2035, KO Drum system.

- Adjust model structure for required accuracy;
- Understand dynamics of the possible strategies to implement in the model;
- Calibrate parameter values for optimal accuracy of the resulting prediction model;
- Visualize results of the different variable and investigate, properly, cause-effect relationships.
- Update the model features to adjust to variable operating conditions over time.

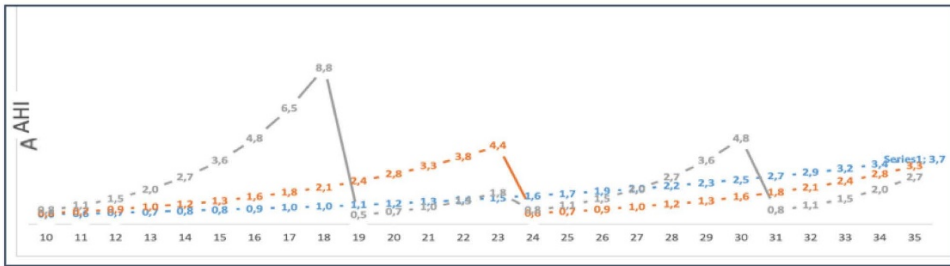


Fig. 18. Projection of AHI for Strategy 2 since 2019 and until 2035. KO Drum system.

Table 2

Annual CapEx (without depreciation) & Opex for both strategies, and two assets (Ko drum and “Punto de apoyo y amortiguación barco” ending 2035. Last two columns are for TotEx & VAN (Net Present Value) of Strategy 2 (the one that was selected).

Equipo	Descripción	Estrategia	Capex/Opex	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	Totex USD (2018-2035)	VAN (MM USD en 2018)		
100-V-101 KO Drum	KO drum del mesle	EST 1	Capex	0.0	58.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	138.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3,022,468	485,081	
		EST 1	Opex	100.0	14.2	14.6	15.0	15.5	45.8	55.6	68.9	87.3	113.1	150.0	19.0	19.6	20.2	20.8	21.4	22.0	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0
		EST 2	Capex	0.0	58.3	0.0	0.0	0.0	115.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		EST 2	Opex	100.0	14.2	14.6	15.0	15.5	45.8	16.4	16.9	17.4	17.9	18.5	19.0	61.8	20.2	20.8	21.4	22.0	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0
100-X-110C Fender	Punto de apoyo y amortigua ción Barco	EST 1	Capex	0.0	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	331,483	151,054
		EST 1	Opex	24.6	9.0	9.2	9.5	9.8	10.1	10.4	14.8	18.0	22.6	11.7	12.0	12.4	12.8	13.1	13.5	14.0	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0
		EST 2	Capex	0.0	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
		EST 2	Opex	24.6	9.0	9.2	9.5	9.8	10.1	10.4	14.8	18.0	22.6	11.7	12.0	12.4	12.8	13.1	13.5	14.0	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 3

CapEx (no depreciation included) and OpEx, over the years, for both strategies until 2035. VAN represent Net Present Value of Strategy 2 (Selected Strategy). Values in Thousands USD\$. All assets under analysis.

Est	Capex/Opex	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	VAN
EST 1	Capex	621	1,932	669	107	504	237	2,508	2,925	2,977	138	4,265	6,866	1,056	125	93	90	2,034	2,369	32,422.5
	Opex	6,911	7,181	7,096	7,116	7,372	7,766	8,108	8,304	8,565	8,827	9,445	9,859	9,426	9,518	9,830	10,166	10,530	10,808	56,667.5
EST 2	Capex	645	1,336	375	1,176	684	1,231	2,700	3,130	2,143	1,168	4,261	3,941	1,498	1,125	300	1,646	893	13	12,338.5
	Opex	6,757	7,132	6,869	7,169	7,262	7,729	7,941	8,025	8,271	8,537	8,893	9,129	9,403	9,697	10,173	10,456	10,786	11,159	55,461.5
EST 1	Totex	7,532	8,993	7,765	7,233	7,476	8,003	10,815	11,231	11,442	9,065	13,709	16,294	10,479	9,644	9,932	10,266	11,428	11,157	79,093.5
	Totex	7,482	8,469	7,068	8,279	8,046	8,954	10,943	11,155	10,414	9,723	13,015	12,470	10,901	11,782	11,167	11,819	11,349	10,799	77,829.5

Concerning the model built in Vensim for the regasification plant, we have:

- Provided the code of the Vensim models developed;
- Shown that it is possible, in a very practical manner at industrial level, increase robustness of the model format, initially developed by GB DNO, adopting a new formulation for AHI and using direct search techniques in the software, to properly calibrate parameters of the model the industrial case study.
- Provided appropriate inputs for the business plan under two scenarios.
- Demonstrated that, besides ensuring plant reliability according to an asset degradation under control (strategy 2), the strategy pays off to the company resulting in a lower TotEx, despite the fact of the computed increase in CapEx.

Therefore, it is demonstrated the adaptability for prediction accuracy of the simulation tool and how the simulation tool becomes a workbench to test different business strategies for a given scenario.

More future work could be accomplished, for instance extending the industrial case study in the paper, it is now easy to deal with prediction issues like:

- Changing preventive maintenance plans and/or operational plans and schedules, to check impact on asset health and in life cycle cost projections;
- To understand the impact of the PM plan fulfilment in asset health;

- To model the problem more precisely discriminating the failure modes of the assets linked to certain types of major maintenance interventions;
- Etc.

Finally, other options could result by using other asset health indexing algorithms and format.

### Appendix A. Vensim Model Equations

```

.Subscript
k : Inactivity, MM, RM ~~~
j : Hm1, Hm2, Hm3 ~~~
i : GA101A, GA231A ~~~
.Auxiliary variables
RM [i] = SUM (RM Coef [K1] * RM Input [i, K1]) ~~~
RM Input [i, Inactivity] = Inact Table (Acc Inact [i]) ~~~
RM Input [i, MM] = Acc MM Table (Acc MM [i]) ~~~
RM Input [i, RM] = Manuf Reliab Table [i] (Time) ~~~
AFRate [i] = K as Std FRate [i] * (1 + C [i] * H [i]) + ((C [i] * H [i]) / 2) + ((C [i] * H [i]) / 3) ~~~
H [i] = IF THEN ELSE (AHI [i] >= 4, AHI [i], 4) ~~~
MMR [i] = IF THEN ELSE (AHI [i] >= 4, AHI [i], 1, 0) ~~~
OpEx SQ Error [i] = (OOpEx [i] - Acc OpEx [i])^2 ~~~
DH [i] = HI [i] * EXP (RM [i] + HM [i]) ~~~
OCapEx [i] = Observed CapEx Table [i] (Time) ~~~
CapEx SQ Error [i] = (OCapEx [i] - Acc CapEx [i])^2 ~~~
OOpEx [i] = Observed OpEx Table [i] (Time) ~~~
HI [i] = MIN ("H new (0.5) * EXP (beta [i] * Age [i]), 10) ~~~
    
```

```

Acc Inact[i] = Acc POPT[i] - Acc ROPT[i]~~~
HM Input[i, j] = HM Input Table[i, j](Time)~~~
Expected life[i] = Expected life in books[i]/(Fβ[i]*Fel[i])~~~
TotEx[i] = Acc CapEx[i] + Acc OpEx[i]~~~
HM[i] = SUM(HM Coef[j]*HM Input[i, j])~~~
β[i] = (LN("H el(5.5)"/"H new(0.5)"))/(Expected life[i]
/Changes in Fel[i](Time))~~~
.Input Tables
Changes in Fel[GA 101A]([(0, 0) - (200, 1), (0, 1), (200, 1)])~~~
Changes in Fel[GA 231A]([(0, 0) - (200, 1), (0, 1), (200, 1)])~~~
HM Input Table[i, j]([(0, 0) - (200)], (0, 1), (200, 1))~~~
Observed OpEx Table[GA 101A]([(0, 0) -
(200, 100)], (0, 1), (200, 100))~~~
Observed OpEx Table[GA 231A]([(0, 0) -
(200, 100)], (0, 1), (200, 100))~~~
RtA OpE([(0, 0) - (200, 20)], (0, 1), (200, 1))~~~
Observed CapEx Table[GA 101A]([(0, 0) -
(200, 1000)], (0, 0), (200, 1000))~~~
Observed CapEx Table[GA 231A]([(0, 0) -
(200, 1000)], (0, 0), (200, 1000))~~~
Planned OpT[i]([(0, 0) - (200, 2000)], (0, 672), (200, 672))~~~
Real OpT[GA 231A]([(0, 0) - (200, 2000)], (0, 672), (200, 672))~~~
Real OpT[GA 101A]([(0, 0) - (200, 800)], (0, 672), (200, 672))~~~
Acc MM Table([(0, 0) - (20, 1)], (0, 0), (20, 0.5))~~~
Inact Table([(0, 0) - (1, 1)], (0, 0), (1, 0.5))~~~
.Flow variables variables
Dah[i] = IF THEN ELSE(AH[i] < DH[i] : AND : MMR[i] =
0, AH[i], IF THEN ELSE(MMR[i] = 1, AH[i] - 0.5, 0))~~~
lah[i] = IF THEN ELSE(AH[i] < DH[i] : AND : MMR[i] =
0, DH[i], 0)~~~
Ain[i] = IF THEN ELSE(MMR[i] = 1, Age[i], 0)~~~
MM Done[i] = IF THEN ELSE(MMR[i] = 1, 1, 0)~~~
CapEx[i] = MMR[i]*MM Unit Cost[i]~~~
Aout[i] = IF THEN ELSE(MMR[i] = 1, Age at MM[i], 0)~~~
OpT Increase[i] = Real OpT Input[i] +
RtA OpE Input*OpE TMultiplier~~~
OpEx[i] = AFRate[i]*CM Unit Cost[i] + PM Cost[i]~~~
RtA OpE Input = RtA OpE (Time)~~~
Planned OpT Input[i] = Planned OpT[i](Time)~~~
Real OpT Input[i] = Real OpT[i](Time)~~~
OpT Decrease[i] = IF THEN ELSE(MM Done[i] = 1, Age[i], 0)~~~
.Stock Variables
Age at MM[i] = INTEG (Ain[i] - Aout[i], 0)~~~
Acc CapEx[i] = INTEG (CapEx[i], 0)~~~
Acc OpEx[i] = INTEG (OpEx[i], 0)~~~
Acc POPT[i] = INTEG (Planned OpT Input[i], Init OpT[i])~~~
Acc ROPT[i] = INTEG (Real OpT Input[i], Init OpT[i])~~~
Acc RtA OpE[i] = INTEG (RtA OpE Input, 0)~~~
AH[i] = INTEG (lah[i] - Dah[i], DH[i])~~~
Age[i] = INTEG (OpT Increase[i] - OpT Decrease[i], 0)~~~
Acc MM[GA 101A] = INTEG (MM Done[GA 101A], 0)~~~
Acc MM[GA 231A] = INTEG (MM Done[GA 231A], 1)~~~
.Constants
RM Coef[k] = 0.01~~~
Manuf Reliab Table[GA 231A] = 0.1~~~
Manuf Reliab Table[GA 101A] = 0.3~~~
Fel[i] = 1, 1.1~~~
C[i] = 0.15~~~
Init OpT[i] = 8500, 15700~~~
Fdc[i] = 1, 1.5~~~
Fβ[i] = MAX(Fa[i], MAX(Fat[i], MAX(Fdc[i], MAX(Fps[i],
Ft[i])))~~~
Fps[i] = 1~~~
CM Unit Cost[i] = 1000~~~
Ft[i] = 1~~~
PM Cost[i] = 3000~~~

```

```

Fa[i] = 1, 1.2~~~
Fat[i] = 1, 1.3~~~
MM Unit Cost[i] = 5000~~~
K as Std FRate[i] = 1, 2~~~
HM Coef[j] = 0.02~~~
"H el(5.5)" = 5.5~~~
"H new(0.5)" = 0.5~~~
Expected life in books[GA 101A] = 42500~~~
Expected life in books[GA 231A] = 25000~~~
OpE TMultiplier = 3~~~
.Parameters
Desired Age at MM[i] = 40~~~
Desired AH at MM[i] = 5.5~~~
.Simulation Control
FINAL TIME = 200 ~Quarter ~The final time for the simulation. |
INITIAL TIME = 0 ~Quarter ~The initial time for the simulation. |
SAVEPER = TIMESTEP ~Quarter [0,?] ~The frequency with which
output is stored. |
TIMESTEP = 1 ~Quarter [0,?] ~The time step for the simulation. |

```

## Declaration of Competing Interest

The authors of this paper declare no conflicts of interest that could be inherent in their submissions.

## References

- Australian Local Government Association, 2015. National State of the Assets Report. <https://alga.asn.au/national-state-of-the-assets-report-2015/>.
- Azmi, A., Jasni, J., Azis, N., Kadir, M.Z.A., 2017. Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (March), 687–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.094>.
- Crespo Márquez, A., et al., 2020. Defining asset health indicators (AH) to support complex assets maintenance and replacement strategies. A generic procedure to assess assets deterioration. In: Crespo Márquez, A., Macchi, M., Parlikad, A. (Eds.), *Value Based and Intelligent Asset Management*. Springer, Cham. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-20704-5\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-20704-5_4).
- De la Fuente, A., Crespo, A., Sola, A., Guillén, A., Gómez, J., Amadi-Echendu, J.E., 2021a. Planning major overhaul and equipment renovation based on asset criticality and health index. In: Crespo Márquez, A., Komljenovic, D., Amadi-Echendu, J. (Eds.), *14th WCEAM Proceedings. WCEAM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_8), Springer, Cham.
- De la Fuente, A., Guillén, A., Crespo, A., Sola, J., Gómez, P., Moreu, V., Gonzalez-Prida, 2018. Strategic view of an assets health index for making long-term decisions in different industries. Chapter 126. In: *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World: Proceedings of ESREL 2018, June 17–21, 2018, Trondheim, Norway*. <http://dx.doi.org/10.1201/9781351174664> (1st ed.). CRC Press.
- Federation of Canadian Municipalities (FCM) and other seven partner organizations, 2020. *The Canadian Infrastructure Report Card (CIRC) 2019*. <http://canadianinfrastructure.ca/downloads/canadian-infrastructure-report-card-2019.pdf>.
- García, Juan Martín, 2018. *System Dynamic Modelling with Vensim: a book for learning the applications of simulation models to manage complex feedback control*. In: *Innova Books*.
- GB DNO groups, Health & Criticality - Version 1.1. Available at: 2017. *DNO Common Network Asset Indices Methodology*. [https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2017/05/dno-common-network-asset-indices-methodology\\_v1.1.pdf](https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2017/05/dno-common-network-asset-indices-methodology_v1.1.pdf).
- Hjartarson, T., Otal, S., 2006a. Predicting future asset condition based on current health index and maintenance level. *ESMO 2006 - 2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*.
- Hjartarson, Thor, Otal, Shawn, 2006b. Predicting future asset condition based on current health index and maintenance level. *ESMO 2006 - 2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*.
- Institute of Assets Management (IAM), Version 1.0. June 2016. *Subjects 6 and 7: Capital Investment Operation and Maintenance Decision-Making*.
- López de Calle, Kerman, Ferreiro, Susana, Aimaiz, Aitor, Sierra, Basilio, 2019. Dynamic condition monitoring method based on dimensionality reduction techniques for data-limited industrial environments. *Comput. Ind.* 112, 103114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2019.07.004>, ISSN 0166-3615.
- Márquez, Adolfo Crespo, Gómez, Juan Francisco, Moreu de Leon, Pedro, Rosique, Antonio Sola, 2013. Modeling on-line reliability and risk to schedule the preventive maintenance of repairable assets in network utilities. *Ima J. Manag. Math.* 24 (October (4)), 437–450. <http://dx.doi.org/10.1093/imaman/dps016>.

- Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F., Service, J., 2008. An approach to determine the health index of power transformers. Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 192–196. <http://dx.doi.org/10.1109/ELINSI.2008.4570308>, July.
- Naderian, A., Piercy, R., Cress, S., Service, J., Wang, F., 2009. An approach to power transformer asset management using health index. IEEE Electr. Insul. Mag. 25 (2), 2. <http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2009.4802595>.
- Powell, M.J.D., 1968. On the calculation of orthogonal vectors. Comput. J. 11 (2), 302–304.
- Powell, M.J.D., 1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. Comput. J. 7 (2), 155–162.
- Scatiggio, F., Pompili, M., 2013. Health index: the TERNA's practical approach for transformers fleet management. IEEE Electrical Insulation Conf. (EIC), 178–182.
- Serra, J., De la Fuente, A., Crespo, A., Sola, A., Guillén, A., Candón, E., Martínez-Galán, P., 2019. A model for lifecycle cost calculation based on asset health index. Pag. 91–98. International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC), 2019. ISBN 978-0-7277-6466-9. Available at: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/icsic.64669.091>.
- Silvestri, Luca, Forcina, Antonio, Introna, Vito, Santolamazza, Annalisa, Cesarotti, Vittorio, 2020. Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: a systematic literature review. Comput. Ind. 123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>, ISSN 0166-3615.
- Teixeira, Evandro Leonardo Silva, Tjahjono, Benny, Alfaro, Sadek Crisóstomo Absi, 2012. A novel framework to link Prognostics and Health Management and Product–Service Systems using online simulation. Comput. Ind. 63 (7), 669–679. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2012.03.004>, ISSN 0166-3615.
- Vermeer, M., Wetzler, J., van der Wielen, P., de Haan, E., de Meulemeester, E., 2015. Asset management decision support modeling, using a health and risk model. PowerTech, IEEE, Eindhoven., 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/PTC.2015.7232556>.



## 6.2. Otras publicaciones

### 6.2.1. Practical application of criticality analysis in the Spanish Natural Gas Transport Network

Javier Serra Parajes

Asset Management Coordinator

Enagás, Madrid, Spain

Adolfo Crespo Márquez

Department of Industrial Management,

School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

#### **Abstract**

Risk management is emerging as one of the fundamental pillars for asset management in modern industry. The appearance of ISO 55001 as well as the recent revision of ISO 9001 introduced this concept as the best basis to make decisions in operation and maintenance.

These regulations do not require the application of a specific technique, so companies are responsible for searching the methodology that best meets their needs. In this case, companies do not only pursue that results provide a clear and relevant information about the risk of equipment, but obtaining these results within a reasonable time and of a large amount of equipment, because in some facilities it could be analysed thousands of items.

The aim of the exhibition is to expose the real case of the application of a specific methodology, criticality analysis, in a particular installation of OIL & GAS industry, a gas transport network. It is not only about reviewing the theoretical concepts that sustain the methodology and the benefits for mass analysis in an optimum time, but to discover those aspects that occur when an real analysis is developed and how may influence the result in a significant way.

**Publication details:**

Book: Proceedings Safety and Reliability Enhancement Throughout Europe:  
Looking Back, Looking Ahead

Vol 1, 2016, Pág 43-52

Publisher: Ingeman

ISBN: 978-84-608-9444-5. INGEMAN

## 6.2.2. Criticality analysis for optimising OPEX cost lifecycle

Javier Serra Parajes

Asset Management Coordinator

Enagás, Madrid, Spain

Adolfo Crespo Márquez

Department of Industrial Management,

School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio Sola Rosique

INGEMAN. Association for the Development of Maintenance Engineering

School of Engineering, Seville, Spain

### **Abstract**

Identification and quantification of cost and value of industrial assets is a field in which much terminology is mixed. When we try to analyze the importance of an asset for our business, to discuss about its costs should not be separated from the value provided by the asset. Most of the times, managers only use the term “cost” because it seems to be more objective. Value is more subjective and more difficult to define. However, we must try to use definitions as amortization, inflation, replacement value in order to simplify the concept of “value” to improve our decisions. In the case of regulated companies, the economic valuation of the facilities is based on a legal normative, so the concept of “cost” may turn to be quite useless. Therefore, it is important to use a methodology that allows us to estimate the value of our assets. We have developed a criticality analysis of our infrastructures in order to assess the relative value of these items for the company. The target is to optimize the operation and maintenance (O&M) strategies at a corporate level. This must have a relevant impact in the OPEX of our company, and may be also an impact in future CAPEX. This paper discusses the methodology

and presents clear examples of how O&M strategy is transformed according to criticality assessments.

**Publication details:**

Journal: IFAC-PapersOnLine

Publisher: Elsevier

Volume 49, Issue 28, 2016, Pages 7-12

ISSN: 2405-8963

DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.002

**IFAC-PapersOnLine**



### **6.2.3. Defining Asset Health Indicators (AHI) to Support Complex Assets Maintenance and Replacement Strategies. A Generic Procedure to Assess Assets Deterioration**

Adolfo Crespo Márquez

Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio de la Fuente Carmona

Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio Guillén López

Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Antonio Sola Rosique

INGEMAN. Association for the Development of Maintenance Engineering  
School of Engineering, Seville, Spain

Javier Serra Parajes

Asset Management Coordinator  
Enagás, Madrid, Spain

Pablo Martínez Galán

Department of Industrial Management,  
School of Engineering, University of Seville, Sevilla, Spain

Juan Izquierdo

Ik4-Ikerlan Technology Centre, Operations and Maintenance Technologies Area,  
Gipuzkoa, Spain

**Abstract:**

An Asset Health Index (AHI) is a tool that processes data about asset's condition. That index is intended to explore if alterations can be generated in the health of the asset along its life cycle. These data can be obtained during the asset's operation, but they can also come from other information sources such as geographical information systems, supplier's reliability records, relevant external agent's records, etc. The tool (AHI) provides an objective point of view in order to justify, for instance, the extension of an asset useful life, or in order to identify which assets from a fleet are candidates for an early replacement as a consequence of a premature aging. The purpose of this Chapter is to develop a generic procedure to easily obtain an AHI that can reasonably measure the current degradation of the assets, offering the possibility to compare their status to the one expected for the at their age and functional location. As a result of the procedure, an organization will have an objective tool to prioritize interventions, attention and the renewal of significant equipment. In this Chapter we first review the concept and the most relevant models in the literature, then we introduce the methodology and different examples related to the different steps. Finally conclusions of the chapter are presented.

**Publication details:**

Book: Value Based and Intelligent Asset Management Mastering the Asset Management; Transformation in Industrial Plants and Infrastructures

Vol 1, 2020, Pág 91-98

Publisher: Springer

ISBN: 978-0-7277-6466-9

DOI: 10.1680/icsic.64669.091

# 7. REFERENCIAS

---

1. Amadi-Echendu JE, Willett R, Brown K, Hope T, Lee J, Mathew J, et al. What is engineering asset management? *Eng Asset Manag Rev.* 2010;1.
2. Raouf A, Duffuaa S, Ben-Daya M, Pintelon L, Pinjala SK, Vereecke A. Evaluating the effectiveness of maintenance strategies. *J Qual Maint Eng.* 2006;12(1).
3. Pintelon LM, Gelders LF. Maintenance management decision making. *Eur J Oper Res.* 1992;58(3).
4. González Fernández FJ. Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. FC Editorial. Fundación Confemetal; 2009. 595 p.
5. Mishra RP, Anand G, Kodali R. Development of A framework for world-class maintenance systems. *J Adv Manuf Syst.* 2006;5(2).
6. Roda I, Parlikad AK, Macchi M, Garetti M. A framework for implementing value-based approach in asset management. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* 2016.
7. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 55001:2014, Asset management-Management systems-Requirements. International Organization For Standardization; 2014.
8. Asociación Española de Normalización. UNE-EN 13306:2018 Mantenimiento. Terminología del Mantenimiento. AENOR

- INTERNACIONAL S.A.U. bajo; 2018.
9. Cholasuke C, Bhardwa R, Antony J. The status of maintenance management in UK manufacturing organisations: Results from a pilot survey. *J Qual Maint Eng.* 2004;10(1).
  10. Pinjala SK, Pintelon L, Vereecke A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. *Int J Prod Econ.* 2006;104(1).
  11. Beebe R. Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management. Vol. 1, *Engineering Asset Management Review.* 2010.
  12. Muller A, Crespo Marquez A, Iung B. On the concept of e-maintenance: Review and current research. *Reliab Eng Syst Saf.* 2008;93(8).
  13. Crespo Márquez A. *The Maintenance Management Framework.* The Maintenance Management Framework. Springer London; 2007.
  14. Holler J, Tsiatsis V, Mulligan C, Avesand S, Karnouskos S, Boyle D. From Machine-To-Machine to the Internet of Things. *From Machine-To-Machine to the Internet of Things.* 2014.
  15. Iung B, Levrat E, Marquez AC, Erbe H. Conceptual framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms. *Annu Rev Control.* 2009;33(2).
  16. Babiceanu RF, Seker R. Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Comput Ind.* 2016;81.
  17. Gorecky D, Schmitt M, Loskyll M, Zühlke D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. In: *Proceedings - 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2014.* 2014.
  18. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 9001:2015 Quality management systems Requirements.* International Organization For Standardization; 2015.
  19. Sankar NR, Prabhu BS. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *Int J Qual Reliab Manag.* 2001;18(3).



20. Smith R. Equipment Criticality Analysis. Analysis. 2015;61(6).
21. Wireman T. Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. 2005.
22. MIL-STD-1629A. MIL-STD-1629A PROCEDURES FOR PERFORMING A FAILURE MODE, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS. Notes Queries. 1980;s7-X(252).
23. Gargama H, Chaturvedi SK. Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic. IEEE Trans Reliab. 2011;60(1).
24. Pillay A, Wang J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliab Eng Syst Saf. 2003;79(1).
25. Marquez AC. The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance [Internet]. Springer series in reliability engineering CN - TS192 .C72 2007. 2007. XIX, 333. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84628-821-0>
26. Braglia M, Frosolini M, Montanari R. Fuzzy TOPSIS Approach for Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. Qual Reliab Eng Int. 2003;19(5).
27. NORSOK. Z-008 NORSOK STANDARD Criticality analysis for maintenance purposes. Nor Technol Cent. 2001;Rev. 2.
28. Duffuaa SO, Raouf A. Planning and Control of Maintenance Systems. Planning and Control of Maintenance Systems. 2015.
29. Moss TR, Woodhouse J. Criticality analysis revisited. Qual Reliab Eng Int. 1999;15(2).
30. Puente J, Pino R, Priore P, de la Fuente D. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. Int J Qual Reliab Manag. 2002;19(2).
31. Taghipour S, Banjevic D, Jardine AKS. Prioritization of medical equipment for maintenance decisions. Vol. 62, Journal of the Operational Research Society. 2011.
32. Arunraj NS, Maiti J. Risk-based maintenance-Techniques and applications. J

- Hazard Mater. 2007;142(3).
33. Brown SJ, Le May I. Risk-based hazardous release protection and prevention by inspection and maintenance. *J Press Vessel Technol Trans ASME*. 2000;122(3).
  34. Khan FI, Haddara M. Risk-Based Maintenance (RBM): A new approach for process plant inspection and maintenance. *Process Saf Prog*. 2004;23(4).
  35. Moore WJ, Starr AG. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities. *Comput Ind*. 2006;
  36. Crespo Márquez A, Moreu De León P, Sola Rosique A, Gómez Fernández JF. Criticality Analysis for Maintenance Purposes: A Study for Complex In-service Engineering Assets. *Qual Reliab Eng Int*. 2016;32(2):519–33.
  37. John Moubray. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). ... com co/documentos/Sop\_Med-RCM .... 2004;
  38. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14224:2016 - Petroleum and natural gas industries, collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. International Standardization Organization, Geneva, 2006. 2016.
  39. Adams J, Parlikad AK. Dynamic maintenance based on criticality in electricity network. In: *IET Conference Publications*. 2015.
  40. Bevilacqua M, Braglia M. Analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliab Eng Syst Saf*. 2000;70(1).
  41. Molenaers A, Baets H, Pintelon L, Waeyenbergh G. Criticality classification of spare parts: A case study. In: *International Journal of Production Economics*. 2012.
  42. Gilchrist W. Modelling failure modes and effects analysis. *Int J Qual Reliab Manag*. 1993;10(5).
  43. Ben-Daya M, Raouf A. A revised failure mode and effects analysis model. *Int J Qual Reliab Manag*. 1996;13(1).
  44. Niu G, Yang BS, Pecht M. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliab Eng Syst Saf*. 2010;95(7).

45. Conde Cavero R, García Saura A, Martínez Vidal F. Guía práctica de gestión del mantenimiento industrial. Balartí E, editor. Asociación Española de Mantenimiento; 2012. 319 p.
46. Lee J, Ni J, Djurdjanovic D, Qiu H, Liao H. Intelligent prognostics tools and e-maintenance. *Comput Ind.* 2006;57(6).
47. Shen W, Hao Q, Mak H, Neelamkavil J, Xie H, Dickinson J, et al. Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. *Adv Eng Informatics.* 2010;24(2).
48. de la Fuente A, Crespo A, Sola A, Guillén A, Gómez J, Amadi-Echendu JE. Planning Major Overhaul and Equipment Renovation Based on Asset Criticality and Health Index. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* 2021.
49. Macchi M, Fumagalli L. A maintenance maturity assessment method for the manufacturing industry. *J Qual Maint Eng.* 2013;19(3).
50. Macchi M, Garetti M. Information requirements for e-maintenance strategic planning: A benchmark study in complex production systems. *Comput Ind.* 2006;57(6).
51. Macchi M, Márquez AC, Holgado M, Fumagalli L, Martínez LB. Value-driven engineering of E-maintenance platforms. *J Manuf Technol Manag.* 2014;25(4).
52. Zille V, Bérenguer C, Grall A, Despujols A. Simulation of maintained multicomponent systems for dependability assessment. In: *Springer Series in Reliability Engineering.* 2010.
53. Haddad G, Sandborn PA, Pecht MG. An options approach for decision support of systems with prognostic capabilities. *IEEE Trans Reliab.* 2012;61(4).
54. Rizzolo L, Abichou B, Voisin A, Kosayyer N. Aggregation of health assessment indicators of industrial systems. In: *Proceedings of the 7th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2011 and French Days on Fuzzy Logic and Applications, LFA 2011.* 2011.
55. Abichou B, Voisin A, Iung B, Do Van P, Kosayyer N. Choquet integral

- capacities-based data fusion for system health monitoring. In: IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2012.
56. Abichou B, Voisin A, Iung B. Choquet integral capacity calculus for health index estimation of multi-level industrial systems. *IMA J Manag Math.* 2015;26(2).
57. López de Calle K, Ferreiro S, Arnaiz A, Sierra B. Dynamic condition monitoring method based on dimensionality reduction techniques for data-limited industrial environments. *Comput Ind.* 2019;112.
58. Hjartarson T, Otal S. Predicting future asset condition based on current health index and maintenance level. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance, ESMO. 2006.
59. Jahromi AN, Piercy R, Cress S, Service JRR, Fan W. An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electr Insul Mag.* 2009;25(2).
60. Naderian A, Cress S, Piercy R, Wang F, Service J. An approach to determine the health index of power transformers. In: Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 2008.
61. Azmi A, Jasni J, Azis N, Kadir MZAA. Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation. Vol. 76, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2017.
62. Vermeer M, Wetzler J, Van Der Wielen P, De Haan E, De Meulemeester E. Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model. In: 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015. 2015.
63. Silvestri L, Forcina A, Introna V, Santolamazza A, Cesarotti V. Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Comput Ind.* 2020;123.
64. Deloitte/Canadian Electricity Association. Asset Health Indices: A Utility Industry Necessity. 2014;
65. Group NAIMW. Dno Common Network Asset Indices Methodology [Internet]. 2015 [cited 2018 Feb 18]. Available from: [https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2017/05/dno\\_common\\_netwo](https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2017/05/dno_common_netwo)

- rk\_asset\_indices\_methodology\_v1.1.pdf
66. Australian Local Government Association. National State of the Assets Report. 2021 [cited 2022 Jan 30]; Available from: <https://alga.asn.au/app/uploads/ALGA-2021-NSoA-Technical-Report-FINAL.pdf>
  67. of Canadian Municipalities F. The 2019 Canada Infrastructure Report Card. [cited 2022 Jan 30]; Available from: <http://canadianinfrastructure.ca/downloads/canadian-infrastructure-report-card-2019.pdf>
  68. Pompili M, Scatiggio F. Classification in iso-attention classes of hv transformer fleets. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul.* 2015;22(5).
  69. Scatiggio F, Pompili M. Health index: The TERNA's practical approach for transformers fleet management. In: 2013 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2013. 2013.
  70. Lee J, Bagheri B, Kao HA. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf Lett.* 2015;3.
  71. Crespo Márquez A, de la Fuente Carmona A, Guillén López AJ, Rosique AS, Serra Parajes J, Martínez-Galán Fernández P, et al. Defining Asset Health Indicators (AHI) to Support Complex Assets Maintenance and Replacement Strategies. A Generic Procedure to Assess Assets Deterioration. In: *Value Based and Intelligent Asset Management.* 2020.
  72. Serra J, de la Fuente A, Crespo A, Sola A, Guillén A, Candón E, et al. A model for lifecycle cost calculation based on asset health index. In: *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making.* 2019.
  73. Powell MJD. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Comput J.* 1964;7(2).
  74. Powell MJD. On the calculation of orthogonal vectors. *Comput J.* 1968;11(3).
  75. IAM - Subjects 6 and 7: Capital Investment Operation and Maintenance Decision-Making [Internet]. [cited 2022 Jan 30]. Available from: <https://theiam.org/knowledge-library/subjects-6-and-7-capital-investment-operation-and-maintenance-decision-making/>

76. Teixeira ELS, Tjahjono B, Alfaro SCA. A novel framework to link Prognostics and Health Management and Product-Service Systems using online simulation. *Comput Ind.* 2012;63(7).
77. De la Fuente A, Guillén A, Crespo A, Sola A, Gómez J, Moreu P, et al. Strategic view of an assets health index for making long-term decisions in different industries. In: *Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World - Proceedings of the 28th International European Safety and Reliability Conference, ESREL 2018.* 2018.
78. Márquez AC, Gómez JF, De Leon PM, Rosique AS. Modelling on-line reliability and risk to schedule the preventive maintenance of repairable assets in network utilities. In: *IMA Journal of Management Mathematics.* 2013.
79. Holsapple CW, Joshi KD. Organizational knowledge resources. *Decis Support Syst.* 2001;31(1).
80. Lee J, Kao HA, Yang S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. In: *Procedia CIRP.* 2014.