

Proyecto Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de
Empresas

Análisis de criticidad y centrado en fiabilidad en una
Acería.

Autor: Juan Antonio Pastor Rodríguez

Tutor: Juan Francisco Gómez Fernández

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

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

Análisis de criticidad y centrado en fiabilidad en una Acería.

Autor:

Juan Antonio Pastor Rodríguez

Tutor:

Juan Francisco Gómez Fernández

Profesor titular

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Análisis de criticidad y centrado en fiabilidad en una Acería.

Autor: Juan Antonio Pastor Rodríguez

Tutor: Juan Francisco Gómez Fernández

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En este punto me gustaría dar las gracias por su ayuda a Juan Francisco Gómez Fernández ya que sin su inestimable colaboración, no habría sido posible realizar el presente trabajo.

En segundo lugar me gustaría agradecer a mi familia su ayuda durante toda mi existencia.

En tercer lugar gracias Berto, gran parte de este trabajo sale de los paseos contigo.

Por último gracias Ana porque me has ayudado siempre.

Juan Antonio Pastor Rodríguez

Sevilla, 2018

Resumen

Este trabajo comienza con un repaso de la historia de la industria siderúrgica, desde sus orígenes hasta su situación actual tanto a nivel internacional como a nivel nacional.

Posteriormente se realiza un repaso del estado del arte del mantenimiento, abordando los modelos existentes, sus referencias y épocas.

A continuación se escoge uno de los modelos más implementados en grandes empresas en España, teniendo presente el nivel de madurez de la empresa en lo que a gestión del mantenimiento se refiere. Este modelo se implementará a un caso real, la acería eléctrica de Siderúrgica Sevillana en Alcalá de Guadaíra.

Con esta base, se realiza un análisis del mantenimiento mediante un análisis de criticidad. Una vez escogido el equipo, se estudiarán los modos de fallo del equipo mediante RCM para después, analizar uno de los modos de fallo mediante técnica GMM.

Finalmente se realizará un análisis riesgo costo beneficio (RCB) y se abordarán las conclusiones y futuras líneas de investigación.

Agradecimientos	i
Resumen	i
Índice	i
Índice de Tablas	i
Índice de Figuras	i
1 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA	1
1.1 <i>La siderurgia actualmente en el mundo</i>	2
1.2 <i>La siderurgia actualmente en España</i>	3
1.3 <i>Importancia del mantenimiento en el sector siderurgico.</i>	4
2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 <i>Historia y evolución del mantenimiento</i>	5
2.2 <i>Modelos de gestión del mantenimiento.</i>	7
2.2.1 Selección del modelo de gestión del mantenimiento	9
2.2.2 Implementación del proceso de gestión del mantenimiento	10
3 CASO DE ESTUDIO	13
3.1 <i>La acería eléctrica.</i>	15
3.2 <i>Análisis de criticidad.</i>	17
3.2.1 Definición y método	17
3.2.2 Matriz de criticidad	18
3.2.3 Criterios de evaluación.	18
3.2.4 Cálculo de la criticidad	21
3.2.5 Conclusiones de los resultados	22
3.3 <i>Análisis mediante RCM.</i>	22
3.3.1 Definición del RCM	24
3.3.2 Aplicación del RCM	27
3.3.3 Resultado del RCM	29
3.3.4 Conclusiones del RCM	34
3.4 <i>Análisis del modo de fallo mediante técnica GAMM.</i>	34
3.4.1 Conclusiones del GAMM	43
4 ANÁLISIS COSTE RIESGO BENEFICIO	45
4.1 <i>Cálculo del riesgo e impacto con el mantenimiento actual.</i>	45
4.1.1 Función de distribución.	45
4.1.2 Consecuencias.	46
4.1.3 Curva de riesgo.	47
4.1.4 Cálculo de costes e impacto total.	48
4.2 <i>Cálculo del riesgo e impacto con las mejoras adoptadas.</i>	51
4.2.1 Función de distribución.	51
4.2.2 Consecuencias.	52
4.2.3 Curva de riesgo.	53
4.2.4 Cálculo de costes e impacto total.	53
4.3 <i>Conclusiones del RCB.</i>	55

5	CONCLUSIONES	57
6	FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	59
7	GLOSARIO	61
	REFERENCIAS	67
	ANEXOS	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Modelos gestión del mantenimiento	8
Tabla 3–1. Escala de Saaty	19
Tabla 3–2. Matriz de comparación de factores	20
Tabla 3–3. Matriz de comparación de factores normalizada	20
Tabla 3–4. Resultado de la ponderación	20
Tabla 3–5. Tabla análisis criticidad	21
Tabla 3–6. Características técnicas ventilador booster	23
Tabla 3–7. Árbol jerarquía ventilador	27
Tabla 3–8. Clasificación	28
Tabla 3–9. Criterios	29
Tabla 3–10. Resumen RCM	34
Tabla 3–11. Actuaciones - horas	35
Tabla 3–12. Registro valores	36
Tabla 3–13. Resultados de $R(t_i)$ y $Z(t_i)$	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Herramientas antiguas	1
Figura 1-2. Torre Eiffel	2
Figura 1-3. Producción acero China	2
Figura 1-4. Alto horno actualidad	3
Figura 1-5. Producción España [2]	3
Figura 1-6. Consumo interno acero España [2]	4
Figura 2-1. Evolución del mantenimiento	5
Figura 2-2. Evolución hasta la actualidad.	6
Figura 2-3. La actualidad del mantenimiento	7
Figura 2-4. Bloques modelo gestión del mantenimiento	9
Figura 2-5. Esquema ACR	11
Figura 2-6. Coste del ciclo de vida	12
Figura 3-1. Horno de fusión	13
Figura 3-2. Producto terminado	14
Figura 3-3. Proceso siderúrgica	15
Figura 3-4. Filtro y ventiladores principales	15
Figura 3-5. Horno-1	16
Figura 3-6. Colada continua	16
Figura 3-7. Análisis de criticidad	17
Figura 3-8. Matriz de criticidad del caso en estudio	18
Figura 3-9. Criterios de evaluación.	18
Figura 3-10. Diagrama de flujo planta de aspiración de humos	23
Figura 3-11. Diseño ventilador booster	24
Figura 3-12. Desgaste rotor	30
Figura 3-13. Rodamientos	31
Figura 3-14. Bancada	31
Figura 3-15. Carcasa	32
Figura 3-16. Compuerta	32
Figura 3-17. Junta de dilatación	33
Figura 3-18. Acoplamiento	34
Figura 3-19. Diagrama de dispersión $N(t_i) - T_i$	35
Figura 3-20. Diagrama de dispersión con nuevas variables	38
Figura 3-21. Diagrama estado fiabilidad	39
Figura 3-22. Diagrama función de fiabilidad	39

Figura 3-23. Valor vibración	40
Figura 3-24. Valor temperatura	41
Figura 3-25. Datos técnicos ventilador	42
Figura 3-26. Valor temperatura	43
Figura 4-1. Función de distribución	46
Figura 4-2. Curva de riesgo	48
Figura 4-3. Modelo Spp con reparaciones mínimas.	49
Figura 4-4. Curvas.	51
Figura 4-5. Función de distribución	52
Figura 4-6. Curva de riesgo	53
Figura 4-7. Curvas.	55

1 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

La historia de la siderurgia va, como es de esperar, vinculada a la del acero, remontándose hasta cerca del 300 A.C. aunque no es hasta la edad del hierro cuando se populariza su uso para la fabricación de todo tipo de útiles y herramientas. Por tanto, aunque a pequeña escala al inicio, la industria siderlúrgica va forzosamente unida a la evolución de la sociedad.



Figura 1-1. Herramientas antiguas

Dicho lo anterior, no es hasta el siglo XVIII cuando se empieza a utilizar de manera mayoritaria el acero, pasando a sustituir a la madera como principal elemento estructural y cobrando una gran importancia la industria siderúrgica.

A partir del 1800 se produce una revolución en el modo de fabricación del acero, apareciendo los primeros altos hornos y el uso del carbón coke para la fusión y obtención del acero. Se empiezan a realizar con acero edificaciones impensables hasta la época. La fabricación de materiales férricos, es decir, la industria siderúrgica fue uno de los principales motivos que condujo a la revolución industrial.

Durante el siglo XIX se multiplicó la producción del acero por cien pasando a ser de xxxx, convirtiéndose en elemento principal para la construcción de maquinaria y estructuras. La revolución industrial propició que apareciesen diversas innovaciones en la fabricación del acero que llevaba a aumentar cada vez más el consumo del mismo. A finales de siglo aparecen los primeros hornos de arco eléctrico, aportando una gran versatilidad a la producción y empezando a emplearse para la producción en estas fábricas un 80 % de chatarra, logrando reciclar gran parte de la producción pasada.



Figura 1-2. Torre Eiffel

Con la llegada de la primera guerra mundial, se incrementa la producción del acero en un 35%.

El período entre la primera guerra mundial y la segunda guerra mundial no traería grandes cambios en la industria siderúrgica y no hasta mediados del siglo XX en el que se desarrolla el convertidor de oxígeno, el más empleado ahora en la actualidad en altos hornos.

1.1 La siderurgia actualmente en el mundo

En la actualidad se produce unas 1600 millones de toneladas en el mundo [1], de las cuales el 50 % son producidas por China. De las mismas, un 39% del acero se emplea en infraestructura, un 23% en automación, un 14% en manufactura mecánica y el resto en otros productos diversos.

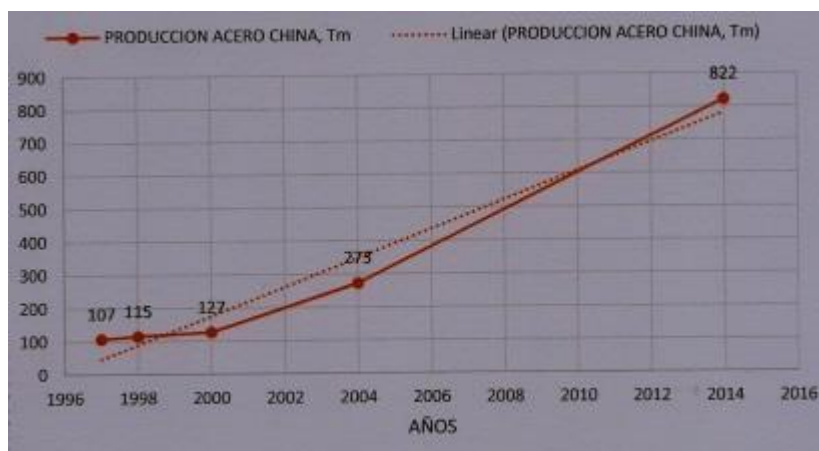


Figura 1-3. Producción acero China

¿Por qué es el acero uno de los productos más utilizados?, principalmente por su bajo costo de producción ya que es básicamente una aleación hierro-carbono, elementos de fácil y barata

adquisición.

Pese a ser un material de gran uso, actualmente hay un exceso de capacidad productiva en el mundo, convirtiendo el mercado del acero en uno de los mercados más complejos y competitivos. Son comunes los aranceles tanto en Europa como en E.E.U.U. al producto de procedencia China, debido a la ralentización interna de su mercado, por lo que se han visto obligados a exportar más acero que años pasados.

Debido a la competitividad del mercado, la industria siderúrgica es una fuente de I+D+I continua y en ella se desarrollan nuevas tecnologías. Por su modo de producción, es un sector ideal para el desarrollo del mantenimiento y sus técnicas.



Figura 1-4. Alto horno actualidad

1.2 La siderurgia actualmente en España

España produce unas 13 millones de toneladas al año de acero, habiéndose reducido la producción en alrededor de un 25% en los últimos años. El sector emplea actualmente a unas 60.000 personas.

La mayor parte de la producción de acero en España está en la zona norte, concentrándose principalmente en el País Vasco, siendo en esta zona en el único lugar de España donde aún quedan industria integrales para la fabricación del acero.



Figura 1-5. Producción España [2]

A la poca demanda interna, se suma el creciente precio de la energía.

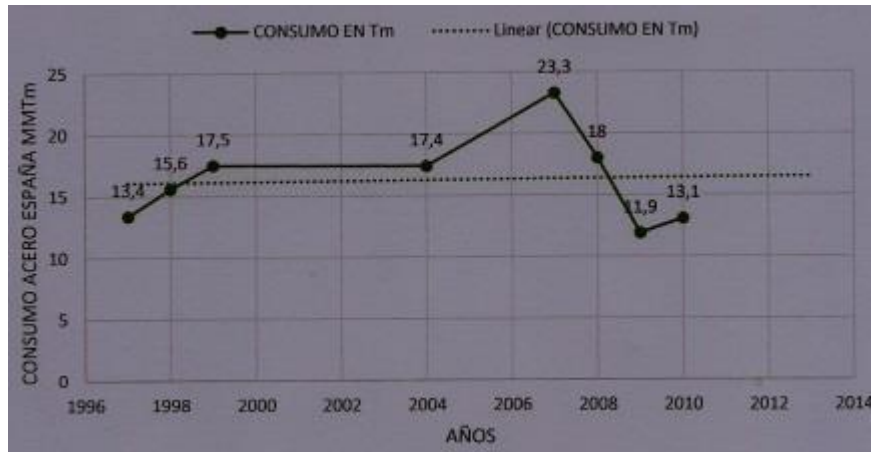


Figura 1-6. Consumo interno acero España [2]

A pesar de ello, en los últimos dos años se ha experimentado una mejoría del mercado que ha provocado una mejoría en el sector siderúrgico español.

1.3 Importancia del mantenimiento en el sector siderúrgico.

La siderurgia es una industria pesada con un proceso continuo en la que un paro de producción provoca un alto lucro cesante. Además por su condición, hay altos riesgos en seguridad y medioambiente. Por todos ello el mantenimiento es estratégico.

Se debe asumir que una avería es un fallo de mantenimiento y utilizar la prevención de riesgos laborales y el orden y la limpieza como motor de mejora.

El mantenimiento es parte fundamental del proceso seguro, fiable y en mejora continua. Por todo ello, parece claro que el objetivo de un plan de mantenimiento debe ser maximizar la capacidad productiva de la planta, ya que sus ingresos son los que nos van a dar un índice de su rentabilidad total sin dejar de lado lo que ya se ha mencionado antes del proceso seguro y fiable.

En el sector siderúrgico, el coste de mantenimiento suele representar un 13% del coste de transformación, lo que nos hace ver la importancia que tiene y el amplio campo de mejora y reducción existente con la implementación de nuevas tecnologías para su análisis.

2 ESTADO DEL ARTE

Según la norma UNE-EN 13306 [1] de “Mantenimiento. Terminología del mantenimiento”, se define el mantenimiento como la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinada a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida.

2.1 Historia y evolución del mantenimiento

Es evidente que debido que a la par de la evolución de la sociedad, se ha producido una evolución del mantenimiento, ya que cada vez son mayores las exigencias e los equipos.

El mantenimiento ha pasado por diferentes etapas desde principios del siglo XX hasta la situación actual.

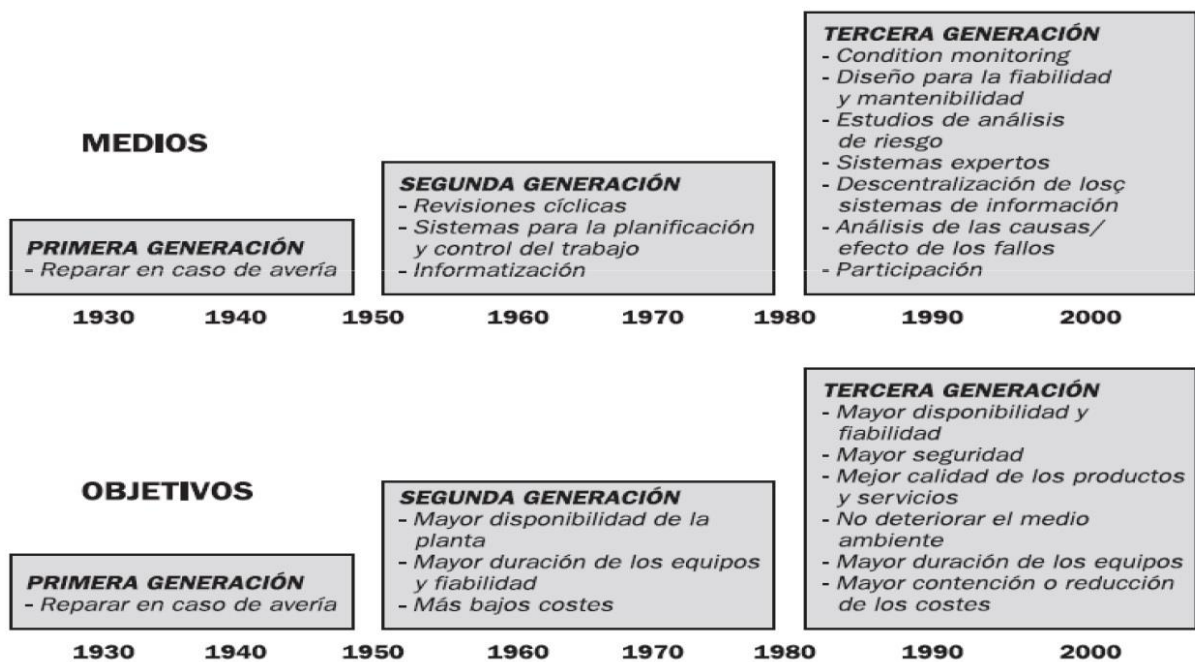


Figura 2-1. Evolución del mantenimiento

Durante la primera generación, las actividades de mantenimiento se ceñían a reparar aquello que se averiaba y a periódicos re-engrases, lubricaciones y limpiezas.

Durante la segunda generación se definen unos objetivos:

- Objetivo 1: Las disponibilidades operacionales de los medios de producción, barcos, aviones y ferrocarriles
- Objetivo 2: Que los equipos duren lo máximo posible en condiciones operativas idóneas y todo ello con los costes más bajos posibles.

Se ponen en marcha sistemas de mantenimiento preventivo basados en revisiones cíclicas a los

equipos e instalaciones. Estas revisiones cíclicas se definen con base en la conocida “curva de bañera”.

En la tercera generación los objetivos además de disponibilidad, fiabilidad y costes se abordan otros aspectos:

- La seguridad, con gran tendencia a emisión de normativas, reglamentaciones, leyes, órdenes, etc. Enfocadas hacia ese aspecto.
- La calidad en los servicios de mantenimiento
- La protección del medio ambiente.

La duración de los equipos mediante el análisis detallado de los costes del ciclo de vida pasó a ser determinante en las decisiones de compra de nuevos equipos. Ahora no sólo es importante que el sistema sea fiable y mantenible, es necesario que su coste total de ciclo de vida sean lo menor posible.

Además, la observancia de la normativa adquiere una importancia primordial. Las administraciones estatales, autonómicas y locales abordan reglamentaciones específicas de mantenimiento. Aparecen reglamentos nuevos de equipos a presión, electricidad, escales mecánicas, etc.. Dan lugar a mantenimientos legales o reglamentarios.

La filosofía y técnicas de mantenimiento de tercera generación se basan en la incorporación de nuevos sistemas más tendentes a intervenir en los equipos e instalaciones sólo cuando es necesario y no se van a establecer actividades preventivas rutinarias, salvo que las mismas sean de obligado cumplimiento o tengan una eficacia y rentabilidad contrastada.

Aparecen los mantenimientos según condición o analizados previamente y los mantenimientos predictivos, en los que se interviene en la máquina antes de que se produzca el fallo o deterioro catastrófico gracias a variables de evolución. Conjuntamente a esto se utilizan otras técnicas como son TPM, RCM, etc.

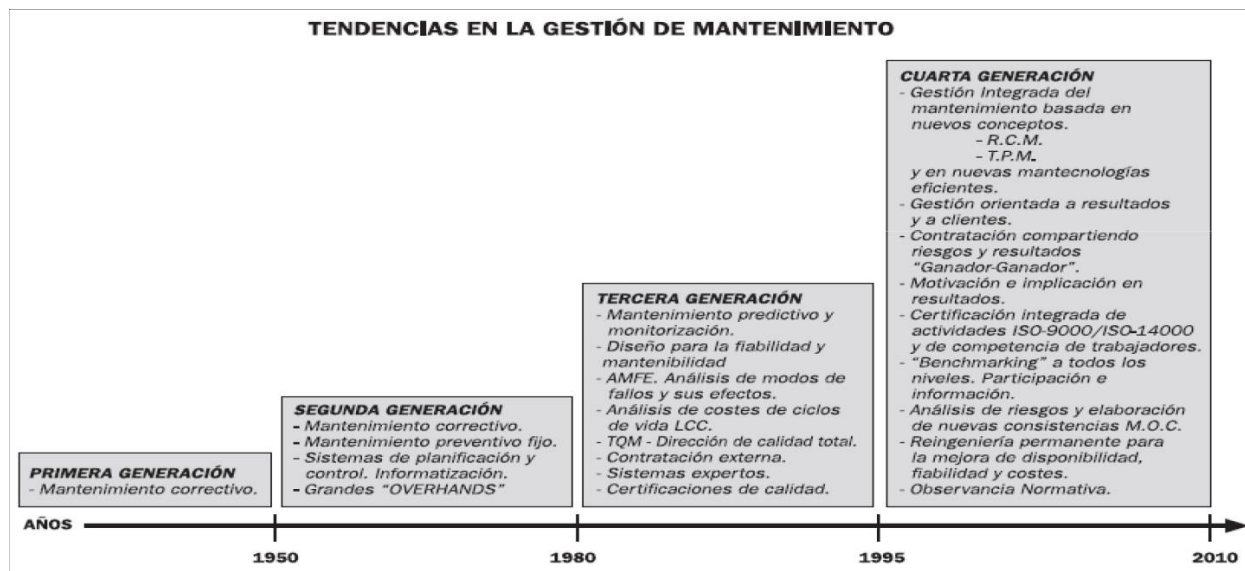


Figura 2-2. Evolución hasta la actualidad.

En la actualidad existe la necesidad de integrar todos los nuevos conceptos de mantenimiento que se han planteado. El mantenimiento debe ser estratégico en la empresa y debe englobar la gestión de gastos, inventarios, activos, operaciones y las personas.

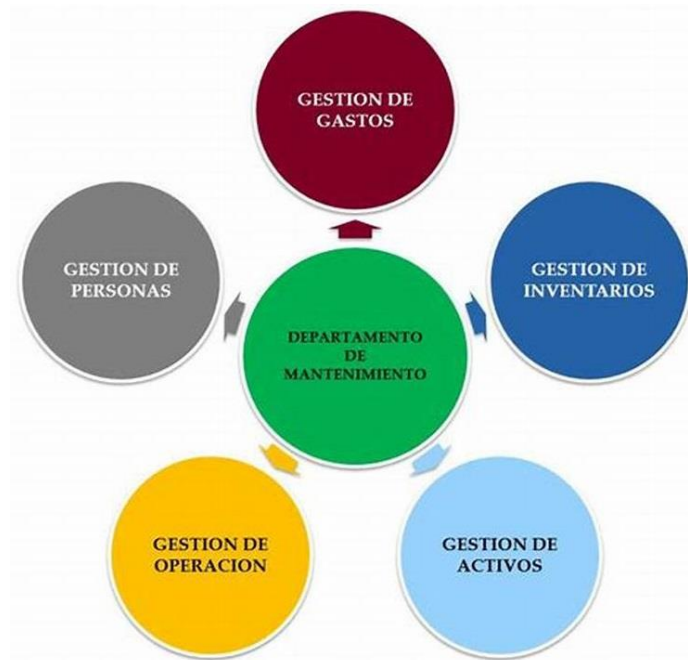


Figura 2-3. La actualidad del mantenimiento

2.2 Modelos de gestión del mantenimiento.

El mantenimiento en la actualidad, según la norma UNE-EN 13306:2011 [1] abarca todas las actividades de gestión que:

- Asegura la disponibilidad del elemento para la función requerida, al coste óptimo.
- Considera los requisitos de seguridad para las personas y otros requisitos obligatorios asociados al elemento
- Considera cualquier impacto sobre el medio ambiente
- Mantiene la durabilidad del elemento y/o calidad del producto o servicio suministrados, considerando los costes cuando se considere necesario.

A lo largo de estos últimos 30 años, se han desarrollado diversos modelos de gestión del mantenimiento. Del artículo de López-Campos y Crespo [2] podemos hacer un orden cronológico de los diferentes modelos que desarrollados, escogidos por el autor en base a os siguientes criterios:

- Que se propusiera un modelo de gestión global y no uno enfocado en una sola fase de la gestión o en una herramienta de mantenimiento.
- Que se propusiera un modelo que no fuera informático o tipo GMAO.
- Que el modelo estuviera publicado en una revista científica

- Que se presentara una propuesta de modelo nueva, no una revisión o aplicación de uno ya existente.
- Que el modelo preferentemnte tuviera una representación gráfica.

Tabla 2-1. Modelos gestión del mantenimiento

AÑO	INNOVACIONES	AUTORES
1990	Plantean un completo sistema de indicadores de mantenimiento.	Pintelon y Van Wassenhove
1992	Exponen la necesidad de que exista un vínculo entre mantenimiento y las demás funciones organizacionales. Resaltan la importancia del uso de las técnicas cuantitativas para la gestión. Proponen la organización por niveles para ejecutar las funciones de mantenimiento. Vislumbran la utilización de sistemas expertos. Mencionan el TPM y RCM.	Pintelon & Gelders
1995	Proponen un análisis de eficacia y eficiencia del mantenimiento. Enfatiza la importancia del liderazgo directivo en la gestión del mantenimiento. Introduce el concepto de Reingeniería de mantenimiento.	Vanneste y Wassenhove Campbell
1997	Sugiere un modelo basado en el concepto de la teoría situacional de gestión.	Riis, et al.
2000	Proponen el uso de una gran variedad de herramientas y conceptos japoneses para el control estadístico de los procesos de mantenimiento, utilizando un módulo llamado "control de retroalimentación".	Duffua, et al.
2001	Orientan su modelo al uso informático, lo expresan en lenguaje IDEF Ø (un lenguaje estándar de modelado).	Hassanain, et al.
2002	Vislumbra la utilización del e-maintenance. Propone una guía para analizar la conveniencia de la subcontratación como un elemento de entrada al sistema de mantenimiento. Incorporan tanto el conocimiento tácito como el explícito y lo integra en una base de datos computarizada. Valoran especialmente la gestión del conocimiento dentro de un modelo de mantenimiento.	Tsang Waeyenbergh y Pintelon
2006	Sugieren la unión de las herramientas QFD y TPM dentro de un modelo de gestión de mantenimiento.	Pramod, et al.
2007	Proponen que mantenimiento se enfoque en el cumplimiento de requisitos de todas las partes interesadas. Aporta un modelo con una metodología de aplicación claramente expresada, orientado a la mejora de la fiabilidad operacional y del coste del ciclo de vida de los activos industriales.	Soderholm, et al. Crespo
2010	Aplicación de tecnologías TIC en todas las etapas dentro de un ciclo de mejora continua. Considera el proceso de selección de repuestos críticos.	López, M., Gómez, J.F.,González, V., Crespo A.

2.2.1 Selección del modelo de gestión del mantenimiento

El modelo de gestión del mantenimiento escogido para la realización de este trabajo es el desarrollado por Adolfo Crespo en el año 2007, uno de los más comunes en la empresa española. El motivo de la elección de este modelo es la familiaridad con el mismo y el extenso uso que se hace de él.

El modelo de gestión del mantenimiento que se va a utilizar para el caso de estudio está basado en ocho bloques secuenciales. Cada uno de ellos representa un área clave de decisión para el mantenimiento de activos y la gestión del ciclo de vida.

Los tres primeros componentes condicionan la efectividad/éxito del mantenimiento, requiere la definición de los objetivos de mantenimiento como una entrada, la cual será derivada directamente de un plan de negocio. La eficacia nos muestra si un departamento o función cumple con sus objetivos.

La segunda parte del proceso, que se corresponde con los bloques cuarto y quinto aseguran la eficiencia.

Los bloques seis y siete hablan del mantenimiento y la evaluación de los costes del ciclo de vida de los activos.

Por último, el bloque ocho garantiza la mejora continua.



Figura 2-4. Bloques modelo gestión del mantenimiento

2.2.2 Implementación del proceso de gestión del mantenimiento

Como apuntado anteriormente, el modelo escogido consta de ocho bloques secuenciales para su implementación.

1. Definición de los objetivos y estrategia del mantenimiento.

Para definir las estrategias de mantenimiento se sigue un método que incluye las siguientes premisas [3]:

- Definición de una serie de principios que conducirán a la implementación de la estrategia y que condicionarán la posterior planificación, ejecución, evaluación, control y análisis para la mejora continua de las actividades de mantenimiento.
- Determinar los medidores KPIs a considerar para la evaluación del rendimiento de las instalaciones.
- Obtener los objetivos y políticas de mantenimiento al más alto nivel, partiendo de los objetivos corporativos.
- Determinar el desempeño o rendimiento actual de las instalaciones productivas.

Esta primera parte del proceso está muy relacionada con la eficacia, una correcta estrategia permitirá una minimización de los costes de mantenimiento indirectos [4].

Para el seguimiento de este punto se suele introducir la herramienta denominada cuadro de mando.

2. Jerarquización de equipos.

Una vez definidos los objetivos y estrategias de mantenimiento, se debe realizar una separación de los activos en función de su criticidad, es decir, clasificarlos en función de su impacto en el sistema productivo o en la seguridad.

Para la realización de esta jerarquización existen gran número de técnicas cuantitativas y cualitativas que ayudan a discernir las prioridades de los activos. Posteriormente para la realización de esta fase se realizará un análisis de criticidad sobre la empresa en estudio.

3. Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.

A continuación de la jerarquización de los equipos en base a su criticidad, se debe realizar una inspección de todos los equipos con un resultado crítico.

Existen muchas técnicas que ayudan a identificar y/o eliminar los puntos débiles en equipos, entre las que están el ACR (Análisis Causa Raíz de los Fallos).

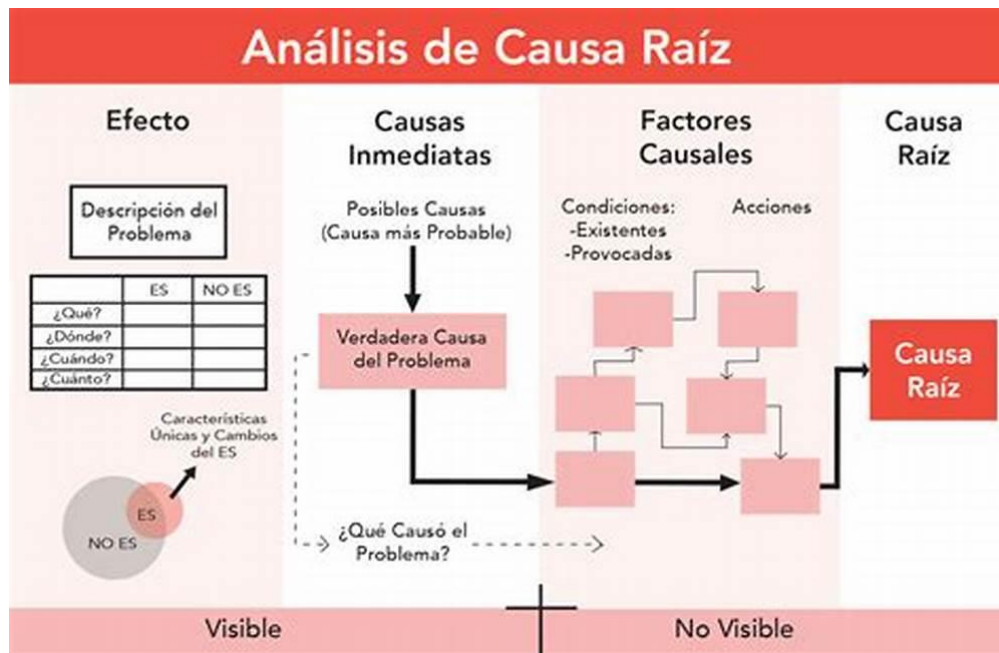


Figura 2-5. Esquema ACR

4. Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios.

Para el diseño del plan de mantenimiento (MP), es necesario identificar sus funciones y el modo en que éstas pueden fallar para así establecer una serie de tareas dentro del plan de mantenimiento basadas en consideraciones económicas y de seguridad. Una técnica de uso común para este paso es el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (MCF) o RCM por sus siglas en inglés. Esta metodología nos ayuda a identificar las necesidades reales de mantenimiento, basándose en siete preguntas:

- ¿Cuáles son las funciones que debe cumplir el activo y cual es el desempeño esperado en su actual contexto operacional definido?
- ¿De qué forma puede fallar completa o parcialmente el equipo?
- ¿Cuál es la causa origen del fallo funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre un fallo?
- ¿Cuáles son las consecuencias de cada fallo?
- ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir la ocurrencia de cada fallo funcional?
- ¿Qué se debe hacer si no es posible prevenir o predecir la ocurrencia del fallo funcional?

5. Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos.

La optimización de la planificación y programación del mantenimiento se puede llevar a cabo para mejorar la efectividad y la eficiencia de las políticas de mantenimiento, dando como resultado un plan de mantenimiento preventivo inicial. Los modelos para optimizar el plan de mantenimiento variarán en función del horizonte de tiempo de análisis.

Para la correcta realización de esta fase, se debe realizar un plan detallado de todas las tareas de mantenimiento que se van a realizar, teniendo presente las necesidades de producción y el coste de oportunidad de la empresa mientras se realizan. El objetivo de todo ello es la optimización de los recursos, minimizando el impacto en el sistema productivo.

Una técnica utilizada para esta fase es la denominada como coste-riesgo (OCR), con ella se valora

cuantitativamente si las consecuencias o pérdidas por la no realización de una actividad de mantenimiento o reemplazo exceden a los costes de realizar dicha actividad. Una vez analizado, se obtiene la curva del impacto total.

6. Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.

Las tareas de mantenimiento deben ser evaluadas y las desviaciones se deben controlar para garantizar los objetivos de la empresa y los KPIs establecidos. La evaluación de las tareas permitirá la optimización del plan de mantenimiento.

7. Análisis del coste del ciclo de vida de un activo y optimización de la sustitución.

En este paso se determina el coste total de un activo en su vida útil. El análisis de un activo puede incluir los costes de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y disposición. Costes como el de adquisición inicial son generalmente fáciles de determinar, pero el análisis del coste del ciclo de vida de un activo depende fundamentalmente de los valores calculados a partir de los análisis de fiabilidad como el porcentaje de fallo, el coste del repuesto y las veces reparado.

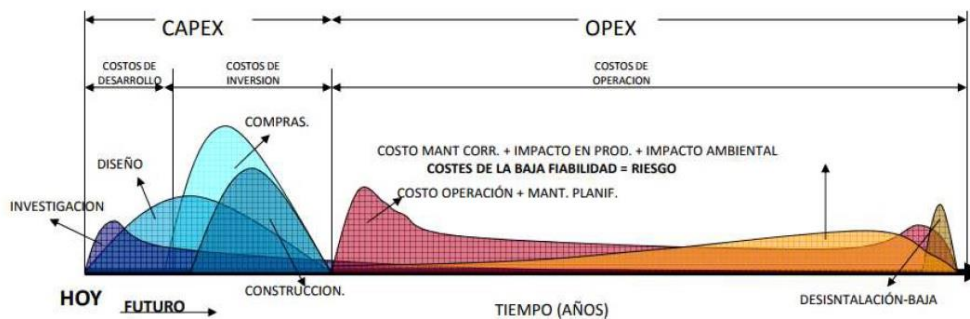


Figura 2-6. Coste del ciclo de vida

Un análisis de este tipo es fundamental cuando se toman decisiones sobre los activos (nueva adquisición) [4]

8. Mejora continua y utilización de nuevas técnicas.

Es la última fase del modelo y se basa en la utilización de nuevas tecnologías (e-mantenimiento) [5] que son consideradas a tener un gran impacto en todo el proceso de gestión.

Dentro de estas técnicas se puede considerar el TPM, el Big data, la realidad aumentada, etc..

3 CASO DE ESTUDIO

Antes de entrar en el caso en estudio se va a realizar una introducción de la fábrica que se va a utilizar para el mismo. Siderúrgica Sevillana se constituye en uno de los núcleos industriales más importantes de Andalucía, situado en Alcalá de Guadaíra, a 6 Km de Sevilla y a 20 Km del Puerto de Sevilla, único Puerto fluvial de España. Su historia es la siguiente:

- En 1965 se constituye como sociedad.
- En 1970 el Grupo Riva entra en el accionariado y la gestión de la sociedad.
- En 1978 el Grupo Riva adquiere todas las acciones.
- En 1989 se realiza una reconversión industrial: modernización de instalaciones, reducción de capacidades productivas y ajustes en la plantilla
- En 1993 certifica con AENOR su Sistema de calidad del proceso y productos.
- En 2002 inicia una participación activa en la mejora tecnológica de la calidad de los aceros corrugados.
- Del 2003-2010 potencia las certificaciones en los sistemas de Calidad, Prevención y Medio Ambiente.
- En el 2015 obtiene la certificación de gestión energética.



Figura 3-1. Horno de fusión

El Grupo Riva es un conjunto de empresas, que opera en el campo de la producción siderúrgica y de las actividades afines, líder absoluto en el sector italiano, sexto en Europa y noveno en el mundo.

La posición lograda en el ámbito nacional e internacional, con más de 50 años de actividad, es también el resultado de una política de expansión que ha llevado a la realización de numerosas adquisiciones de empresas necesitadas de reestructuración y revitalización, la más importante de las

cuales fue en 1995 la privatización por el Gobierno italiano de ILVA. Liderando el Grupo se encuentra la familia Riva.

En la actualidad, Siderúrgica Sevillana se compone de:

- Un horno eléctrico de fusión con capacidad productiva de 135 T/h
- Un horno de afino
- Una máquina de colada continua de seis líneas
- Un horno de calentamiento de palanquilla
- Dos trenes de laminación.

Produce unas 750.000 toneladas de acero empleando a una media de 350 personas directamente y 150 indirectamente teniendo una facturación anual de unos 240 millones de euros.



Figura 3-2. Producto terminado

El proceso de producción en una siderúrgica no integral se resume en líneas generales como sigue:

La chatarra entra por una zona de control y se deposita en el parque de chatarra, da ahí mediante unos recipientes (cestas de chatarra) se cargan en el horno de fusión. En el horno de fusión mediante arco eléctrico se funde la chatarra y se origina el acero líquido. Posteriormente es transportado mediante unos recipientes recubiertos de material refractario (cuchara de colada) hasta el horno de afinación, donde se le da la calidad deseada. A continuación se lleva a la colada continua donde se solidifica y se obtiene el semiproducto (palanquilla).

Este semiproducto es llevado hacia un horno de calentamiento para la laminación en caliente en los trenes de laminación, donde se obtiene el producto deseado.

Una vez obtenido el producto deseado, se amarra y se clasifica para cargarlo posteriormente para su expedición.

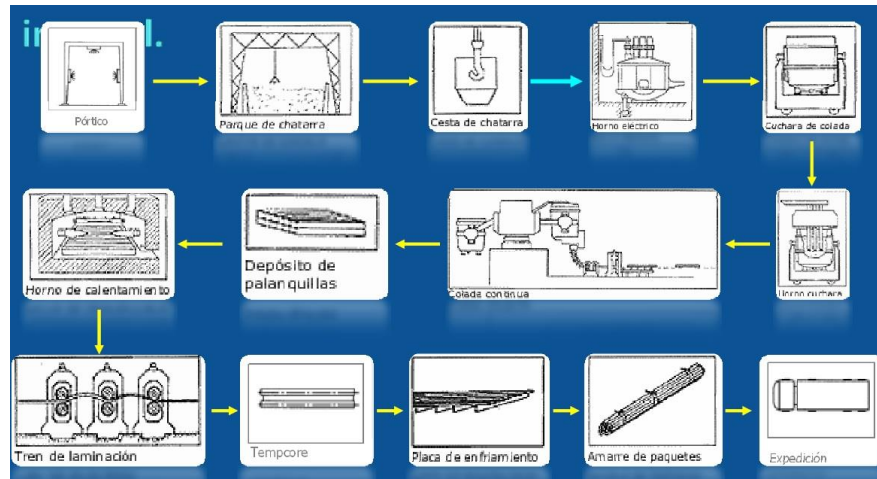


Figura 3-3. Proceso siderúrgica

3.1 La acería eléctrica.

La acería eléctrica es, dentro del proceso de fabricación del acero, donde existe el mayor coste de transformación. La descripción de sus equipos más destacados y en los que se van a centrar nuestro estudio son.

- **Planta de humos:** Es el sistema encargado de depurar los gases extraídos del horno de fusión. Está compuesto por un filtro de mangas, tres ventiladores principales que aspiran los gases y un ventilador booster, que aumenta la aspiración en una zona concreta.



Figura 3-4. Filtro y ventiladores principales

- **Horno-1:** Es el Sistema encargado del proceso de fusión de la chatarra. En este conjunto de máquinas se englobe todos los sistemas que hacen funcionar al mismo.

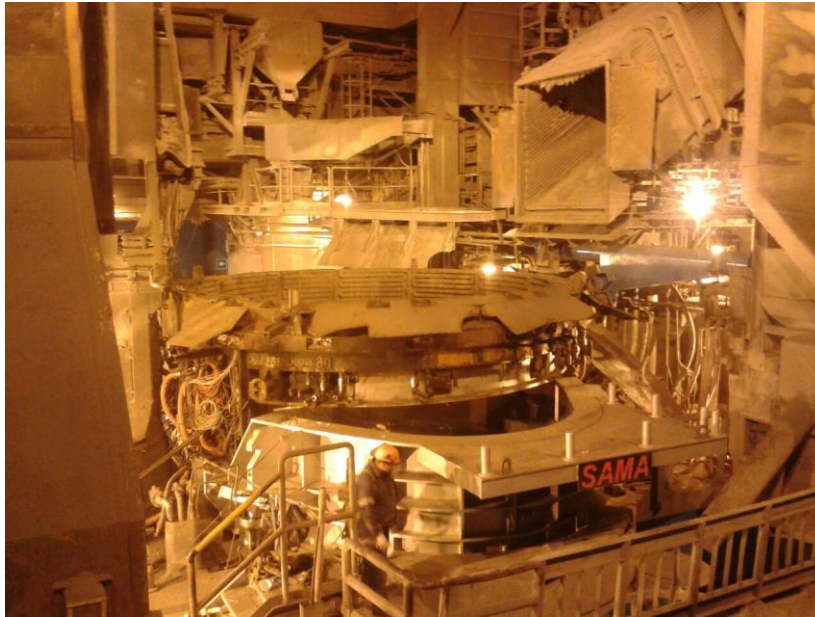


Figura 3-5. Horno-1

- **Colada Continua:** Es la máquina encargada de la solidificación del acero para la obtención del semiproducto, la palanquilla.

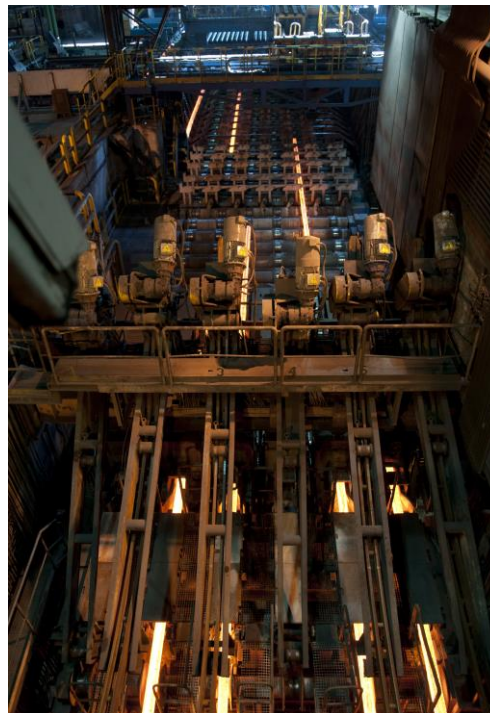


Figura 3-6. Colada continua

3.2 Análisis de criticidad.

3.2.1 Definición y método

El análisis de criticidad es parte del Segundo paso del modelo escogido de los ocho bloques.

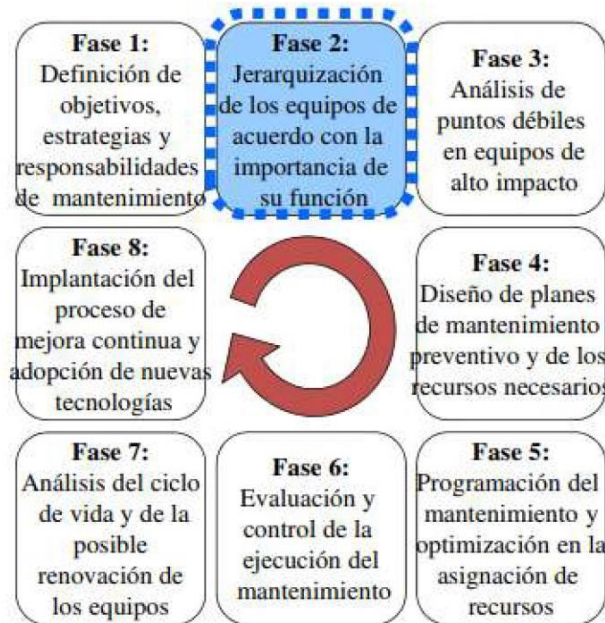


Figura 3-7. Análisis de criticidad

Es un método que permite jerarquizar los activos de la planta en función de su impacto global en el sistema productivo. Se realiza con el fin de optimizar la asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos).

Según Parra y Crespo [9] el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan. El término crítico y la definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones y van a depender del objetivo que se está tratando jerarquizar. Desde esta óptica existen una gran diversidad de herramientas de criticidad, según las oportunidades y las necesidades de la organización. La metodología propuesta, es una herramienta de priorización bastante sencilla que genera resultados semicuantitativos, basados en la teoría del Riesgo (Frecuencia de fallos x Consecuencias).

La criticidad de cada activo se calculará a partir del producto entre la probabilidad de ocurrencia de un fallo por la suma de las consecuencias de éstas, decretando rangos de valores para homologar los criterios de evaluación.

$$\text{Criticidad (CTR)} = \text{Frecuencia (FF)} \times \text{Consecuencia (C)}$$

Frecuencia = N° de fallos en un tiempo determinado

Consecuencia = Impacto Operacional + Flexibilidad + Costos Mtto. + Impacto SAH

Los factores de la consecuencia deben ser ponderados previamente mediante una técnica que se explicará más adelante.

3.2.2 Matriz de criticidad

Es una herramienta para la evaluación de riesgos, que permite presentar de manera gráfica el impacto (severidad o pérdida) y la probabilidad (probabilidad de ocurrencia) de factores de riesgo. Para facilitar la discriminación de los equipos, se utiliza un código de colores que estará asociado al riesgo, obtenido a partir del producto de los dos factores comentados anteriormente.

Frecuencia	3	No crítico 0	No crítico 0	Semicrítico 0	Semicrítico 0	Crítico 1	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0
	2	No crítico 0	No crítico 1	No crítico 0	Semicrítico 3	Semicrítico 2	Semicrítico 0	Crítico 1	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0
	1	No crítico 1	No crítico 7	No crítico 8	No crítico 13	No crítico 9	No crítico 2	No crítico 2	Semicrítico 0	Semicrítico 0	Semicrítico 0
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		Consecuencia									

Figura 3-8. Matriz de criticidad del caso en estudio

3.2.3 Criterios de evaluación.

Los criterios de evaluación se han escogido en base a los tres conceptos principales a tener en cuenta en un proceso industrial, que son la producción, la seguridad y el medio ambiente. A continuación se listan los mismos:

- Frecuencia de fallos (FF): Números de fallos por período de tiempo.
- Impacto operacional (IO): Tanto por ciento de producción afectada
- Tiempo de reparación (TR): Tiempo en devolver el equipo a estado sponible
- Consecuencia en Seguridad y Medioambiente (SHA): Probabilidad de sucesos no deseados con daños a personas o medio ambiente
- Detectabilidad del fallo (DF): Probabilidad de detectar el fallo antes del suceso.
- Coste de reparación (CR): Coste del fallo (€).

PROBABILIDAD DE FALLO (FF)		IMPACTO EN SEGURIDAD O MEDIOAMBIENTE (SHA)	
Alto: > 10 fallos/año	3	Alto	100
Medio: 5-10 fallos/año	2	Medio	50
Bajo: > 5 fallos/año	1	Bajo	1
IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN (IP)		COSTE DE REPARACIÓN (CR)	
Parada de Horno	20	≥ 100,000 €	100
Bajada de productividad	15	≥ 50,000 a 100,000 €	75
Disposición de by-pass	10	≥ 10,000 a 50,000 €	50
No paro de Horno-1	1	≥ 5,000 a 10,000 €	25
TIEMPO DE REPARACIÓN (TR)		< 5,000 €	1
> 12 h	5	DETECTABILIDAD DEL FALLO (DF)	
> 8 A 12 h	4	Detección imposible	100
> 4 A 8 h	3	Baja posibilidad de detección	65
> 1 A 4 h	2	Posibilidad media de detección	30
< 1 h	1	Alta posibilidad de detección	1

Figura 3-9. Criterios de evaluación.

Es fundamental antes de realizar el cálculo, realizar una ponderación de los factores que forma la expresión del riesgo en el análisis de criticidad, ya que en función de los departamentos existentes en la empresa se considerará más importante un factor u otro. Se va a comenzar por definir cada uno de los factores:

Para la ponderación de los criterios de evaluación se utilizará un modelo de criticidad cuantitativo “AHP” muy útil para toma de decisiones multicriterio [9], en problemas en los cuales se necesita evaluarse aspectos tanto cualitativos como cuantitativos.

El proceso de Análisis Jerárquico, desarrollado por L. Saaty [10] esta diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que después especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio [11].

El AHP se fundamenta en:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante asignación de “pesos”
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de sensibilidad.

Una vez introducido el método se procede con el mismo.

1. Establecer prioridades entre criterios

Es el primer paso del método, construir un vector de pesos que analice la importancia relativa que quien toma las decisiones da a cada criterio.

La asignación directa es simple, ya que sólo se debe realizar una valoración sobre la importancia del criterio, en términos cualitativos, y después acudir a una escala que se ha establecido previamente, para obtener los valores numéricos.

Tabla 3–1. Escala de Saaty

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa
Muy débil	1
Débil	3
Moderada	5
Fuerte	7
Muy fuerte	9

2. Matriz de comparaciones pareadas.

Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

- El elemento de la fila i columna j mide cuanto más importante o satisfactorio es el elemento i al elemento j .
- Los elementos de la diagonal principal valen 1: $a_{ii}=1$
- Los elementos simétricos son recíprocos:

Tabla 3–2. Matriz de comparación de factores

	Matriz de comparación			
	Impacto para la producción	Impacto medio ambiente o seguridad	Coste reparación	Detección de fallo
Impacto para la producción	1,000	1,500	2,000	2,000
Impacto medio ambiente o seguridad	0,667	1,000	1,500	1,500
Coste reparación	0,500	0,667	1,000	0,500
Detección de fallo	0,500	0,667	2,000	1,000
Suma	2,667	3,833	6,500	5,000

3. Matriz de comparaciones pareadas.

Una vez obtenida la matriz de comparaciones, se debe obtener la matriz normalizada siguiendo las premisas:

- Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.
- Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna.

Tabla 3–3. Matriz de comparación de factores normalizada

	Matriz Normalizada			
	Impacto para la producción	Impacto medio ambiente o seguridad	Coste reparación	Detección de fallo
Impacto para la producción	0,375	0,391	0,308	0,400
Impacto medio ambiente o seguridad	0,250	0,261	0,231	0,300
Coste reparación	0,188	0,174	0,154	0,100
Detección de fallo	0,188	0,174	0,308	0,200
Suma	1,000	1,000	1,000	1,000

4. Resultado.

A continuación se realiza el promedio de cada fila para obtener la ponderación de cada criterio.

Tabla 3–4. Resultado de la ponderación

	Importancia relativa
Impacto para la producción	0,368
Impacto medio ambiente o seguridad	0,260
Coste reparación	0,154
Detección de fallo	0,217

5. Consistencia.

El método AHP calcula el ratio de consistencia (RC) como el cociente entre el índice de

consistencia (IC) de la matriz de comparaciones (A) y el índice de consistencia aleatorio de A (RI).

Para el cálculo de IC se utiliza la expresión:

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

Donde

$$n_{max} \approx \frac{1}{w_i} \sum_k a_{ik} w_k \forall i$$

El valor de RI que es el índice para matrices aleatorias está tabulado en función del tamaño de las matrices. En este caso es igual a 0,9

6. Resultados

Una vez obtenidos los valores, vemos que el índice CR es inferior a 0,1, establecido según el método como mínimo requerido.

CI = 0,021

CR = 0,023

Valores de n_{max}	
	4,074
	4,081
	4,033
	4,063
Promedio = 4,063	

3.2.4 Cálculo de la criticidad

Una vez definido los criterios para la cuantificación del riesgo, se incluye cada equipo a analizar en una tabla para el cálculo de la criticidad, como se muestra a continuación.

Tabla 3-5. Tabla análisis criticidad

INSTALACIÓN	MÁQUINA	EQUIPO	PRIORIDAD DE FALLO			IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN				TIEMPO DE REPARACIÓN					SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTE				COSTE DE REPARACIÓN				DETECTABILIDAD DEL FALLO		CATEGORÍA DE RIESGO	RISGO				
			Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)	Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)	Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)	Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)	Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)	Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)	Menor de 10 años (a)	Entre 10 y 20 años (a)	Mayor de 20 años (a)							
			1	2	3	1	10	10	20	1	2	3	4	5	2	1	50	100	1	10	50	100	1	10			50	100		
PLANTA DE HORMAS	Filtro Aliment	Transportadores de cadena	2	2	3				3	2	2			2		50	50	1				1	1		1	1433	28,67	No crítico		
		Sistema de mangas	2	2				20	20			5		5		100	100			50		50		50		20	44,77	89,55	Crítico	
		Vibrador de levante	3	1	1					1	2			2		100	100	1				1	1		1	27,90	55,80	No crítico		
		Computor móvil	1	1				20	20			5		5		50	50	1				1	1		1	24,20	48,40	No crítico		
	Ventilador VPI	Inductancias	1	1	10							4		4		50	50			50		50		50		30	30,00	60,00	No crítico	
		Computar	1	1	10					2				2		50	50	1				1	50		50		30	30,00	60,00	No crítico
		Turbina	1	1	10							5		5		50	50			100	100		50		50		30	30,00	60,00	No crítico
	Ventilador VPI	Reductores	1	1	10							4		4		50	50			50		50		50		30	30,00	60,00	No crítico	
		Computar	1	1	10					2				2		50	50	1				1	50		50		30	30,00	60,00	No crítico
		Turbina	1	1	10							5		5		50	50			100	100		50		50		30	30,00	60,00	No crítico
	Ventilador VPI	Reductores	1	1	10							4		4		50	50			50		50		50		30	30,00	60,00	No crítico	
		Computar	1	1	10					2				2		50	50	1				1	50		50		30	30,00	60,00	No crítico
		Turbina	1	1	10							5		5		50	50			100	100		50		50		30	30,00	60,00	No crítico
	Ventilador Booster	Reductores	1	1				20	20			4		4		50	50			50		50		50		30	30,00	60,00	No crítico	
		Computar	1	1				20	20		2			2		50	50	1				1	50		50		30	30,00	60,00	No crítico
		Turbina	2	2				20	20			5		5		100	100			100	100		65		65		44,61	89,23	Crítico	

3.2.5 Conclusiones de los resultados

La priorización de los equipos atendiendo a su nivel de criticidad es una herramienta que ayuda al servicio de Mantenimiento en la toma de decisiones a cerca de diferentes aspectos. El tipo de mantenimiento a realizar a cada equipo o sistema puede establecerse atendiendo a su índice de criticidad. El índice de criticidad obtenido, permite establecer la prioridad para la programación en el análisis de la planta. En caso de coincidencia en el tiempo tanto de correctivos como de preventivos y no disponer de suficientes recursos, será lógico lanzar antes los que afecten al equipo con mayor índice de criticidad. El nivel de criticidad es el mejor punto de partida para decidir los proyectos de mejora o renovación de las instalaciones, ya que permite focalizar los planes de inversión sobre el equipamiento de mayor nivel de criticidad. Muchas de estas mejoras, por ejemplo instalar redundancia, reducirán a su vez el índice de criticidad. El nivel de criticidad es un indicador de mantenimiento que, aislado o combinado con otros indicadores, resulta ser una herramienta útil para mejorar la gestión global del mantenimiento. Uno de los criterios que puede ayudar a la toma de decisiones sobre la necesidad de externalizar el mantenimiento, tanto tipo como alcance, de ciertos equipos es sin duda el nivel de criticidad. El estudio de criticidad permite potenciar la formación del personal de mantenimiento ya que se puede diseñar un plan de formación basado en las necesidades reales de la instalación. La lista jerarquizada de los equipos y sistemas obtenida del análisis de criticidad, ayuda a establecer la lista de repuestos necesarios que deben existir en el almacén de mantenimiento y optimizar su inmovilizado.

En el caso en estudio, el resultado ha sido que hay un 4% de equipos críticos, un 6% de equipos semicríticos y un 90% de equipos no críticos. Esto debería conducir a establecer una estrategia de mantenimiento para cada una de las categorías, estando esta sujeta a posibles cambios debidos a análisis posteriores.

Dentro de los equipos críticos, se va a enfocar el estudio en el ventilador booster de la planta de humos.

3.3 Análisis mediante RCM.

Antes de comenzar con los modos de fallo del equipo, se va a realizar una introducción de las características técnicas del mismo y su función dentro de la empresa.

El ventilador booster de la planta de aspiración de humos realiza la función de aumentar el caudal en una zona focalizada dentro de una instalación de aspiración de humos. La aspiración de humos esté compuesta por tres motores principales que son los que le dan la característica del caudal nominal de la aspiración. Para focalizar una mayor aspiración de algún punto, se instalan ventiladores “booster” que aumentan el caudal y la capacidad de aspiración de un punto determinado.

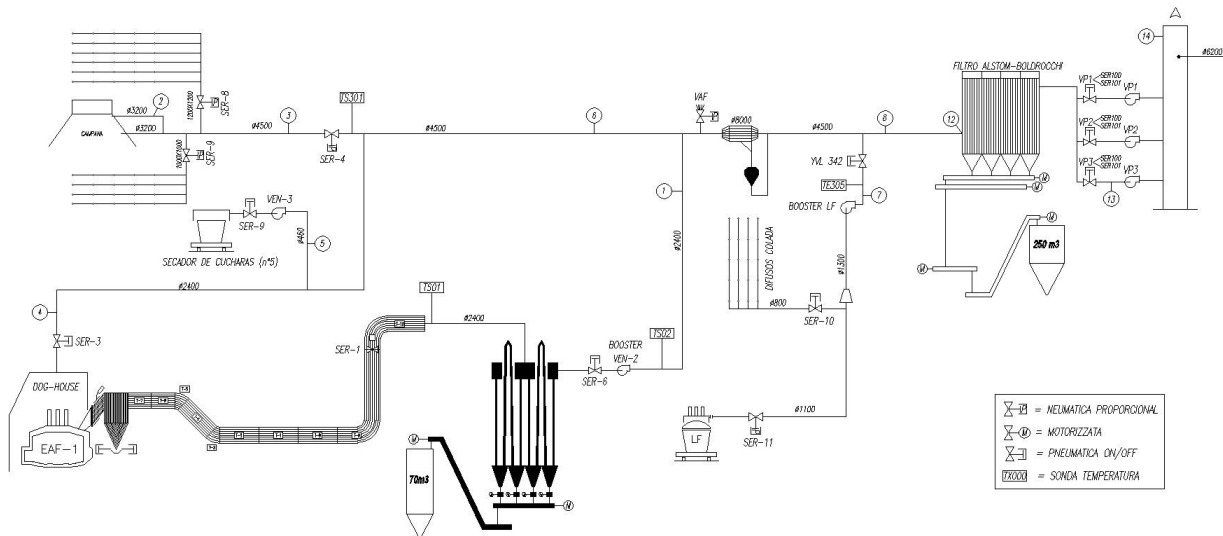


Figura 3-10. Diagrama de flujo planta de aspiración de humos

Como se puede apreciar en el diagrama de flujo, la planta de aspiración de humos realiza el aspirado por diferentes puntos de la acería (Horno fusorio, colada continua, LF), pero es el punto de aspiración del primario del horno-1 en el que interviene el ventilador booster, ya que es el punto de más generación de humos de toda la acería y el más delicado. Es por ello que el booster es un elemento crítico dentro de la instalación, porque de todos los componentes del diagrama de flujo, es él único que si no cumple su función requerida hace que pare el proceso de acería.

El ventilador booster es un ventilador centrífugo de doble aspiración, accionado por un motor de 1100 Kw y cuya turbina tiene una velocidad máxima de giro de 1.020 r.p.m.

Tabla 3-6. Características técnicas ventilador booster

Datos técnicos	
Velocidad de rotación máxima	1020 r.m.p.
Velocidad periférica	113 m/s
Temperatura de trabajo	250 °C
Peso rotor mas mangón	1330 Kg.

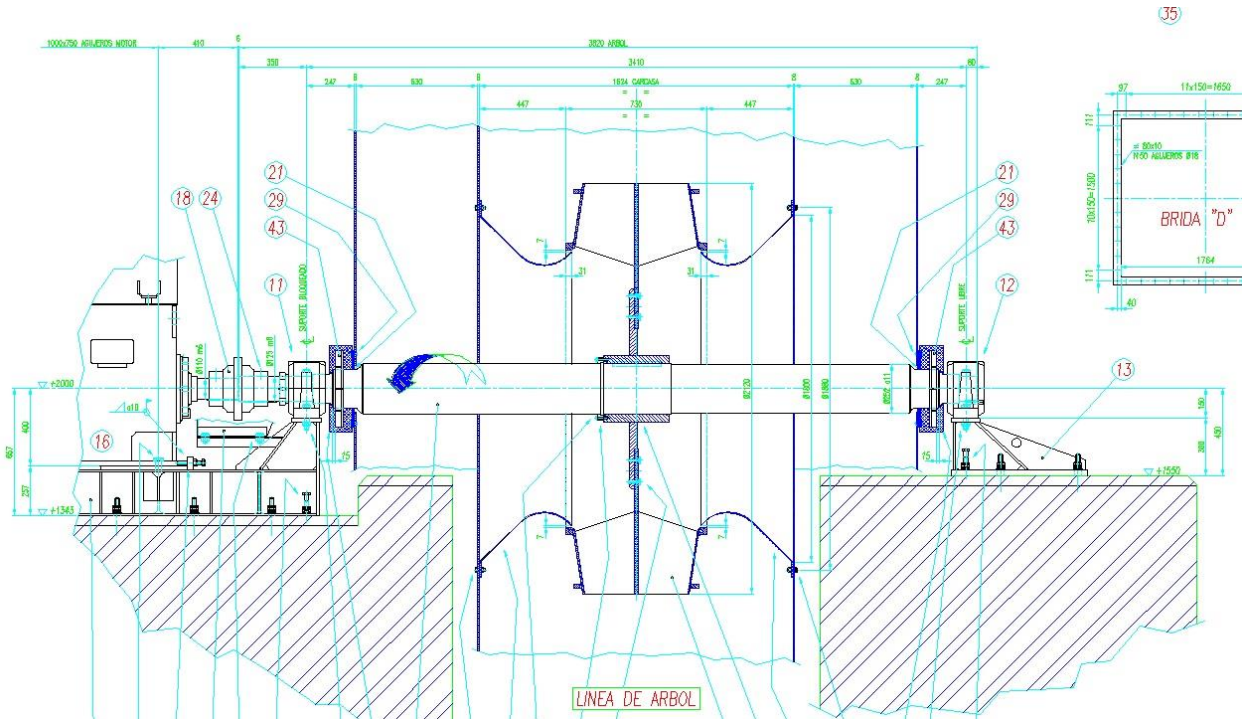


Figura 3-11. Diseño ventilador booster

3.3.1 Definición del RCM

El RCM es una guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias o condiciones sobre los activos más importantes operacionalmente hablando. No es una fórmula matemática y su garantía se fundamenta principalmente en el análisis funcional de los activos realizado por un grupo de trabajo. “El esfuerzo desarrollado por el equipo natural, permite generar un sistema de gestión del mantenimiento flexible, que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la organización, tomando en cuenta, la seguridad personal, el ambiente, las operaciones y la razón costo/beneficio” [14].

El RCM es una metodología que permite determinar estrategias efectivas de mantenimiento que permitan garantizar el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de producción. Es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una planta industrial y que presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. Inicialmente fue desarrollada para el sector de aviación, donde los altos costes derivados de la sustitución sistemática de piezas amenazaba la rentabilidad de las compañías aéreas. Posteriormente fue trasladada al campo industrial, después de comprobarse los excelentes resultados que había dado en el campo aeronáutico.

Tradicionalmente los tipos de mantenimiento han sido 3, los llamados mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo. El concepto de mantenimiento es muy amplio, en él se engloban no solo las tareas de mantenimiento propiamente dichas, sino también la gestión de esas tareas, los recursos tanto materiales como humanos, los costes..., existe toda una ingeniería dedicada a cada uno de estos aspectos buscando su optimización. Del análisis RCM saldrán tareas a realizar que serán del tipo:

Mantenimiento Correctivo.

Estas tareas de mantenimiento se dan para recuperar la operatividad de un elemento o sistema una vez que se ha producido el fallo del mismo, es decir una vez que ha perdido la capacidad de realizar su función requerida. Operaciones típicas de este tipo de tarea son:

- Detección del Fallo.
- Localización del Fallo.
- Desmontaje.
- Recuperación o sustitución.
- Montaje.
- Pruebas
- Verificación.

A su vez el mantenimiento correctivo se puede dividir en correctivo inmediato y correctivo planificable:

Mantenimiento Correctivo Inmediato es aquel que debe ser acometido una vez aparezca el fallo, desde el punto de vista de la empresa, afecta directamente a la capacidad de producción de la planta, bien impidiéndola ocasionando un paro de producción o bien limitándola, reduciendo su rendimiento. Estas tareas son críticas para la planta y la producción, deben ser analizadas con cuidado y poner medios y herramientas para controlar y evitar que se vuelvan a repetir, convirtiendo esa tarea correctiva inmediata en un futuro mantenimiento preventivo o predictivo.

El Mantenimiento Correctivo Planificable, es aquel correctivo que si bien no para la producción en ese momento, ni la limita, puede llegar a hacerlo en un corto periodo de tiempo, tiempo necesario para planificar la intervención en una parada programada de la planta, como cualquier tarea correctiva debe ser analizada con detenimiento para encontrar formulas para controlar o eliminar dicho fallo.

Mantenimiento Preventivo.

Estas tareas de mantenimiento se dan para reducir la probabilidad de que ocurra un fallo del elemento o sistema a niveles aceptables para la propiedad, o bien para maximizar la operatividad. Una tarea programada tipo, aunque no todas, consta de las siguientes actividades:

- Desmontaje.
- Recuperación o sustitución.
- Montaje.
- Pruebas.
- Verificación.

Las tareas de mantenimiento preventivo se realizan antes de que se produzca el fallo del sistema y se caracterizan por realizarse con una periodicidad fija, previamente establecida en el plan de mantenimiento de la instalación. Su principal inconveniente es precisamente esa periodicidad fija ya que se puede dar el caso de que estemos invirtiendo demasiados recursos en unas revisiones con una periodicidad tan alta, que desde que la aparición de los síntomas de un fallo hasta la siguiente revisión, dicho fallo se haya producido, o bien una periodicidad tan baja que se realice demasiadas revisiones seguidas sin detectar cambios en los síntomas y sin necesidad aparente para ello. Por tanto la selección de este tipo de mantenimiento frente a otros debe ser realizada cuando no exista un indicador o estimador adecuado de la condición de trabajo del elemento o sistema. Una tarea programada nunca llega a evitar todos los fallos por lo que en algún momento de la vida útil del sistema será necesaria la realización de una tarea correctiva. Existen un cierto grupo de tareas preventivas que, sin obedecer al formato tradicional, son importantes y están incluidas en todos los planes de mantenimiento, estas son:

- Lubricaciones.
- Limpiezas.
- Calibraciones.
- Ajustes.

Las tareas programadas se realizan de forma periódica, el periodo de realización debe ser cuidadosamente calculado y modificado por la experiencia recogida en la planta donde se aplique.

Mantenimiento Predictivo.

Las tareas predictivas son una actividad de vigilancia de la condición de un elemento o sistema, por lo tanto el objetivo de la vigilancia de la condición, se cual sea la forma de hacerlo, es la observación de los parámetros que suministran información sobre los cambios en el sistema y que avisan de los síntomas de aparición de mecanismos de fallo en algún elemento o componente del sistema. Hoy en día, gracias a la automatización, se tienen cada vez más monitorizados los sistemas, esto es fundamental para poder implantar tareas de mantenimiento predictivo en ellos, y por tanto poder anticiparse a cualquier fallo del mismo, aumentando así su fiabilidad. Una tarea predictiva típica consta de las siguientes actividades:

- Toma de datos de la condición.
- Evaluación de la condición.
- Interpretación de la condición.
- Toma de decisiones, para predecir el momento de realización de la tarea de mantenimiento preventivo encaminada a reestablecer la condición.

Este tipo de mantenimiento también se le conoce como Mantenimiento Basado en la Condición. Mediante la vigilancia de la condición o parámetro que se esté observando, se puede determinar el instante más adecuado para realizar la tarea de mantenimiento que resuelva el problema detectado y coloque la instalación en el estándar que se quiere mantener. En la práctica hay 2 tipos de parámetros observables que permiten evaluar la condición del elemento o sistema:

- Indicadores.
- Estimadores.

Indicadores son aquellos que indican la condición del elemento o sistema en el instante en el que se realiza la comprobación. Entre posibles parámetros indicadores tenemos: Niveles de presión y de líquidos, de temperatura, de velocidad, tensiones, recorridos, geometrías. Estimadores son parámetros observables que permiten estimar la condición del elemento o sistema en cada instante del tiempo operativo. Entre posibles parámetros estimadores tenemos: Espesores, grietas, vibraciones, ruidos. En general las tareas predictivas son inspecciones de los indicadores o estimadores para tomar los datos necesario para su posterior análisis, el objetivo es determinar variaciones en la condición del elemento y articular mecanismos que ayuden al proceso de toma de decisión para saber el momento en el que realizar la tarea que devuelva el elemento o sistema a su condición óptima de trabajo. Con las nuevas tecnologías en informática y automática, estas operaciones se simplifican un poco, se monitorizan instalaciones en continuo para visualizar el comportamiento de sus parámetros y así ayudarnos a estar prevenidos ante un fallo, habiéndose ya instalado niveles de alarma cuando la condición alcanza su nivel crítico.

3.3.2 Aplicación del RCM

Para la realización del RCM se van a seguir varias fases:

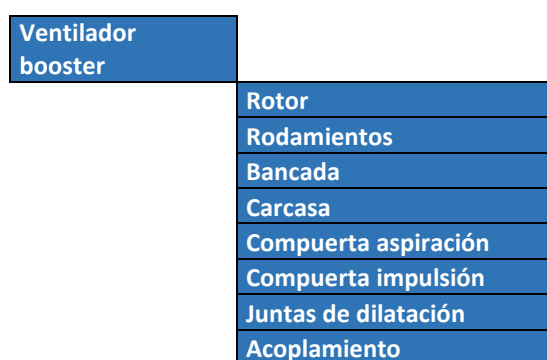
- Fase 1: Codificación.

Codificación y listado de todos los subsistemas, equipos y elementos que componen el sistema que se está estudiando. Recopilación de esquemas, diagramas funcionales, diagramas lógicos, etc.

El primer problema que se plantea al intentar realizar un análisis de fallos según la metodología del RCM es elaborar una lista ordenada de los equipos que hay en ella.

Se debemos expresar esta lista en forma de estructura arbórea, en la que se indiquen las relaciones de dependencia de cada uno de los ítem con los restantes.

Tabla 3-7. Árbol jerarquía ventilador



- Fase 2: Estudio de funcionamiento.

Estudio detallado del funcionamiento del sistema. Listado de funciones del sistema en su conjunto. Listado de funciones de cada subsistema y de cada equipo significativo integrado en cada subsistema.

Ventilador booster: Forma parte del sistema de aspiración de humos de la acería. Aumenta la aspiración primaria del horno de fusión.

Rotor: Elemento girante que aspira el aire para impulsarlo posteriormente.

Rodamientos: Elementos que permiten el giro del rotor.

Bancada: Anclaje donde van sujetos los rodamientos.

Carcasa: Recubrimiento exterior del ventilador.

- Fase 3: Fallos funcionales.

En esta fase se determinan los fallos funcionales y técnicos. Un fallo es la incapacidad de un ítem para cumplir alguna de sus funciones. Por ello se decía en el apartado anterior que si se realiza correctamente el listado de funciones, es muy fácil determinar los fallos: habrá un posible fallo por cada función que tenga el ítem (sistema, subsistema o equipo) y no se cumpla. El histórico de averías es una fuente de información muy valiosa a la hora de determinar los fallos potenciales de una instalación. El estudio del comportamiento de una instalación, equipo o sistema a través de los documentos en los que se registran las averías e incidencias que pueda haber sufrido en el pasado aporta una información esencial para la identificación de fallos. Con esta base se realiza un estudio de las averías sufridas por el equipo.

Vibraciones
 Desgaste rotor
 Desgaste carcasa

- Fase 4: Modos de fallo.

Se determinan los modos de fallo o causas de cada uno de los fallos encontrados en la fase anterior. Una vez determinados todos los fallos que puede presentar un sistema, un subsistema o uno de los equipos significativos que lo componen, deben estudiarse los modos de fallo. Se podría definir 'modo de fallo' como la causa primaria de un fallo, o como las circunstancias que acompañan un fallo concreto. Cada fallo, funcional o técnico, puede presentar, como se puede observar, múltiples modos de fallo. Cada modo de fallo puede tener a su vez múltiples causas, y estas a su vez otras causas, hasta llegar a lo que se denomina 'causas raíces'. Es importante definir con qué grado de profundidad se van a estudiar los modos de fallo, de forma que el estudio sea abordable y técnicamente factible. Es aconsejable estudiar modos de fallo y causas primarias de estos fallos, y no seguir profundizando. De esta forma, se puede perder una parte de la información valiosa, pero a cambio, se logra realizar el análisis de fallos de toda la instalación con unos recursos razonables y en un tiempo razonable. Hay que recordar que, según Pareto, el 20% de las causas son responsables del 80% de los problemas.

- Fase 5: Consecuencias del modo de fallo.

Clasificación de los fallos en críticos, importantes o tolerables en función de las consecuencias. Para la ejecución de esta fase, se debe elaborar una tabla en la que se tendrán en cuenta la gravedad del fallo, la posibilidad de que ocurra y lo posibilidad de que no se detecte.

Tabla 3–8. Clasificación

GRAVEDAD "G"	1,2	Ínfima: Ningun Problema
	3,4	Tolerable: Sin parada
	5,6,7	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.
	8,9	Importante: Paro de acería.
	10	Crítico: Riesgo medioambiental o de seguridad
Probabilidad de producirse "P"	1	Muy raro: > 2 años
	2	Raro 1: <> 2 años
	3,4	Poca: 6 meses <>1 año
	5,6	Frecuente: 3<>6 meses
	7	Muy frecuente: 1 <> 3 meses
	8,9	Habitual: 1 semana <> 1mes
	10	Muy habitual: Todos los dias <> 1 semana
Probabilidad de no detección "D"	1,2,3	Ínfima
	4,5,6	Baja
	7,8,9	Elevada
	10	Muy Elevada

La consecuencia del modo de fallo vendrá dado por la multiplicación de GxPx_D. Se establecerá un criterio para definir si se asume la reparación del modo de fallo correctivamente o se debe realizar preventivo a alguna mejora técnica.

Tabla 3–9. Criterios

CRITERIOS DECISIÓN
Correctivo < 70
Preventivo, predictivo o mejora técnica > 71

- Fase 6: Determinación de las medidas para evitar el fallo y elaboración del plan de mantenimiento.

En esta fase se estudian y plantean las medidas a adoptar y se programa el plan de mantenimiento, es decir, se elabora el Plan de Mantenimiento, lista de mejoras, planes de formación y procedimientos de operación y de mantenimiento. Determinadas las medidas preventivas para evitar los fallos potenciales de un sistema, el siguiente paso es agrupar estas medidas por tipos (tareas de mantenimiento, mejoras, procedimientos de operación, procedimientos de mantenimiento y formación), lo que luego facilitará su implementación.

El resultado de esta agrupación será:

Plan de Mantenimiento.

Inicialmente el principal objetivo buscado. El plan de mantenimiento lo componen el conjunto de tareas de mantenimiento resultante del análisis de fallos. Puede verse que aunque era el objetivo inicial de este análisis, no es el único resultado útil.

Lista de mejoras técnicas a implementar.

Tras el estudio, se tendrá una lista de mejoras y modificaciones convenientes de realizar en la instalación.

Actividades de formación.

Las actividades de formación determinadas estarán divididas normalmente en formación para personal de mantenimiento y formación para personal de operación.

Lista de Procedimientos de operación y mantenimiento a modificar.

Se habrá generado una lista de procedimientos a elaborar o a modificar que tienen como objetivo evitar fallos o minimizar sus efectos.

Del seguimiento de cada una de las fases anteriormente descritas, se obtiene la siguiente tabla que engloba la ejecución del RCM y las medidas a adoptar.

3.3.3 Resultado del RCM

En este apartado se va a realizar un repaso del resultado del RCM partiendo de cada modo de fallo de cada componente:

1.- Rotor.

Del rotor se han estudiado dos modos de fallo:

- Desgaste: Es un modo de fallo que se produce por el propio modo de funcionamiento o lo

que es lo mismo, por el proceso en sí de la producción, ya que por este ventilador pasa todo el polvo que se aspira del horno de fusión, debido a que está antes de la llegada al filtro. Es el modo de fallo que se va a estudiar más detalladamente mediante técnica GMM. Este modo de fallo produce un descenso en la aspiración por parada del ventilador. Debido a los factores explicado anteriormente, de la aplicación del RCM resulta que se debe de mantener mediante preventivo, predictivo o realizar una mejora técnica. En el caso en cuestión, se decide intalar sensores para controlar en continuo sus parámetros de funcioamiento.

- Vibración: Este modo de fallo se produce por desgaste de la turbina. Se han diferenciado los modos de fallo de desgaste de la turbina, ya que en la planta se produjo un desgaste tal que hubo que parar el ventilador, mientras en otras ocasioens se ha detectado vibraciones y se han bajado las revoluciones por minuto de trabajo. De la aplicación del RCM resulta que se debe de mantener mediante preventivo, predictivo o realizar una mejora técnica. En el caso en cuestión, se decide intalar sensores para controlar en continuo sus parámetros de funcionamiento.

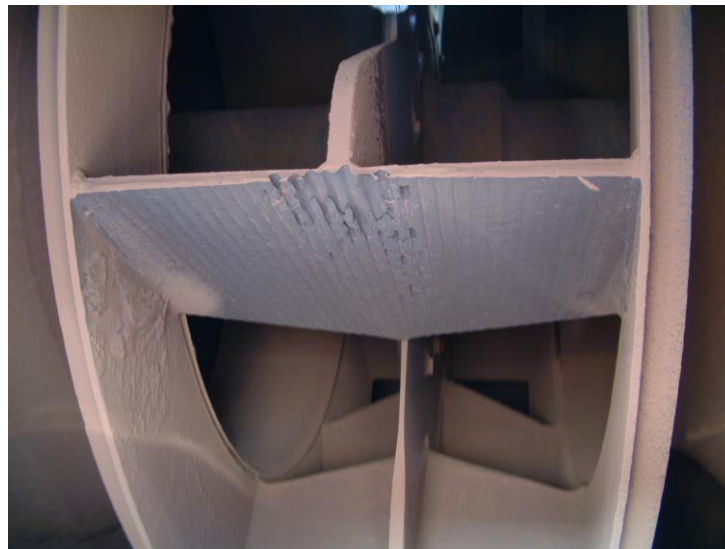


Figura 3-12. Desgaste rotor

2.- Rodamientos.

De los rodamientos se han estudiado dos modos de fallo:

- Vibraciones: Las vibraciones se ha determinado que la causan dos cosas, la falta de lubricante y la entrada de suciedad. En todo caso, siempre origina un descenso en la aspiración debido a que se deben bajar las revoluciones por minutos del ventilador para reducir las vibraciones. Para ambos casos se decide instalar sensores de vibración para su control en contínuo, medida común a modos de fallo anteriores.
- Temperatura: La temperatura se ha determinado que la causa una falta de lubricación. Para este caso se decide montar un sensor de temperatura para su control en continuo, estableciendo valores de funcionamiento.



Figura 3-13. Rodamientos

3.- Bancada.

De la bancada se ha estudiado un modo de fallo:

- Vibraciones: Para este modo de fallo aplica lo mismo que en los anteriores casos. Las posibles vibraciones la originan la tornillería floja.



Figura 3-14. Bancada

4.- Carcasa.

De la carcasa se ha estudiado un modo de fallo:

- Salida de polvo al recinto: Se produce por el desgaste propio del proceso. Para este modo de fallo salen actuaciones correctivas.



Figura 3-15. Carcasa

5.- Compuerta de aspiración:

Para la compuerta de aspiración se han estudiado dos modos de fallo:

- Que no abra o cierre la compuerta: Para este modo de fallo han dado resultado intervenciones correctivas.
- Rotura de álabes: Para este modo de fallo han dado resultado intervenciones correctivas.



Figura 3-16. Compuerta

6.- Compuerta de impulsión:

Para la compuerta de aspiración se han estudiado dos modos de fallo:

- Que no abra o cierre la compuerta: Para este modo de fallo han dado resultado intervenciones correctivas.
- Rotura de álabes: Para este modo de fallo han dado resultado intervenciones correctivas.

7.- Junta de dilatación:

Para la junta de dilatación se ha estudiado un modo de fallo:

- Salida de polvo al recinto: Se produce por el desgaste propio del proceso. Para este modo de fallo se decide realizar un preventivo anual para la sustitución de la misma.

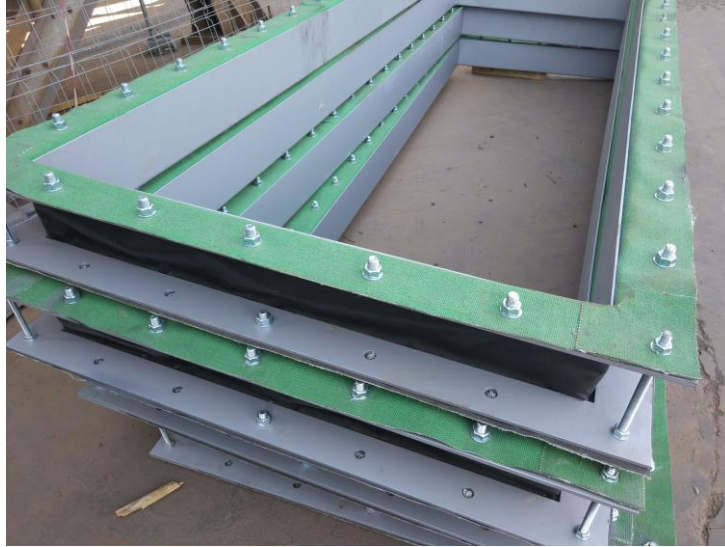


Figura 3-17. Junta de dilatación

8.- Acoplamiento.

Para el acoplamiento se ha estudiado un modo de fallo:

- No transmite movimiento: Para este modo de fallo han dado resultado intervenciones correctivas. Este fallo se produce cuando la parte elástica del acoplamiento se rompe o presenta problemas.



Figura 3-18. Acoplamiento

3.3.4 Conclusiones del RCM

Como se puede observar, del RCM han salido muchas medidas para controlar y garantizar la funcionalidad de la máquina a estudio.

Tabla 3–10. Resumen RCM

VENTILADOR BOQUITA		Código: P-0001											
COMPONENTE AFECTADO	MODO DE FALLO	EFECTO	CAUSAS	CONTROLES	PROBLEMAS	FAVORES NO OCURREN	FRECUENCIA TAREA	INDICADOR TAREA	TIEMPO PROMEDIO (HRS)	TIEMPO PROMEDIO (MIN)	ESPECIALIZACIÓN NECESARIA	GRUPO MTO (PROFESIÓN)	
Rotor	Desgaste	Disminución aspiración	Presión del proceso	No acción	C1	Crítico: Deterioro estructural o de seguridad	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	200	
					FD	3,5	Poco: 6 meses <+1 año	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	Preventivo, predictivo o inspección técnica
	FR	8	Extremo										
	C2	0	Moderado: Falso de inspección sin paro de planta	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	100				
Vibraciones	Disminución aspiración	Desgaste de la turbina por mayor presión del proceso	Presión normal	No acción	FD	3,5	Poco: 6 meses <+1 año	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	Preventivo, predictivo o inspección técnica
					FR	8	Extremo						
Rodamientos	Vibraciones	Disminución aspiración	Estado de lubricación	No acción	C1	0	Moderado: Falso de inspección sin paro de planta	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	100
					FD	3,5	Poco: 6 meses <+1 año	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	Preventivo, predictivo o inspección técnica
	FR	8	Extremo										
	C2	0	Moderado: Falso de inspección sin paro de planta	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	100				
	FD	3,5	Poco: 6 meses <+1 año	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	Preventivo, predictivo o inspección técnica				
	FR	8	Extremo										
Temperatura	Disminución aspiración	Falta lubricación	Presión normal	No acción	C1	0	Moderado: Falso de inspección sin paro de planta	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	100
					FD	3,5	Poco: 6 meses <+1 año	Insular sistemas de potencia para evitar el riesgo	En continuo	0	0	ELECTRICO	Preventivo, predictivo o inspección técnica
FR	8	Extremo											
Bancada	Vibraciones	Disminución aspiración	Temblado agua	Presión normal	C1	0	Moderado: Falso de inspección sin paro de planta					48	
					FD	1	Muy raro: > 2 años	Eliminar problema				Correctivo	
					FR	8	Extremo						
Carcasa	Salida polvo al proceso	Disminución aspiración	Presión del proceso	No acción	C1	0	Moderado: Falso de inspección sin paro de planta					48	
					FD	1	Muy raro: > 2 años	Eliminar problema				Correctivo	
					FR	8	Extremo						

La mayoría de las tareas a acometer van encaminadas a la monitorización de máquinas para obtener de este modo una mayor fiabilidad de la máquina. Es importante este punto ya que cada vez se tiende más a utilizar este tipo de herramientas, dejando de lado las revisiones diarias realizadas por personal de mantenimiento o producción. Esto, además de aumentar la fiabilidad de la máquina, lleva a una reducción de costes de mantenimiento como se puede constatar posteriormente en el RCB. Las decisiones tomadas van encaminadas a eliminar tareas preventivas que no aportan valor y sustituirlas por monitorización en continuo de la máquina.

3.4 Análisis del modo de fallo mediante técnica GMM.

En este apartado, se va a estudiar el modo de fallo señalado en el RCM consistente en el desgaste de la turbina. Se va a centrar en analizar el mantenimiento realizado al equipo mediante técnica GMM [12], determinando las actuaciones de mantenimiento que no aportan valor y estableciendo nuevo parámetros de control que ayuden a evitar el fallo. La técnica GMM (Graphical Analysis for Maintenance Management), es un método para analizar gráficamente los parámetros de mantenimiento. Ayuda a realizar un análisis rápido y sencillo del equipo de mantenimiento y las operaciones que se realizan. Ayudará a contestar las siguientes preguntas:

- ¿Qué correctivo se ha realizado entre las revisiones?
- ¿Está ejecutado correctamente?
- ¿Es adecuado el mantenimiento preventivo que se realiza?
- ¿Es necesario aumentar la sensorística en la máquina?

El fallo se produjo el 22 de Mayo de 2018, cuando se detectó un bajo consumo del motor que acciona el ventilador y un gran aumento del humo presente en la acería. Una vez parada la planta y puesta la máquina en seguridad se procedió a examinar la turbina, observándose que estaba muy deteriorada, habiéndose soltado el roto del eje. Provocó un paro de producción de 16 horas.

En primer lugar se va a realizar una recogida de datos de los históricos de la máquina para la

realización del diagrama de dispersión de Nelson Aalen [13] que mostrará la acumulación de intervenciones en el equipo a lo largo del tiempo.

Tabla 3-11. Actuaciones - horas

N(ti)	Ti(horas)		N(ti)	Ti(horas)
1	123		17	2643
2	246		18	2731
3	369		19	2819
4	615		20	2907
5	861		21	3083
6	984		22	3206
7	1353		23	3171
8	1476		24	3470
9	1599		25	3593
10	1722		26	3962
11	1845		27	4331
12	1968		28	4454
13	2091		29	4577
14	2115		30	4700
15	2379		31	4911
16	2467			

En la tabla anterior, N(ti) indica el número de actuaciones de mantenimiento realizadas a la máquina donde diferenciamos:

Ti indica las horas de funcionamiento transcurridas entre cada intervención.

De los datos de la tabla 3-7 se puede sacar el siguiente diagrama de dispersión.

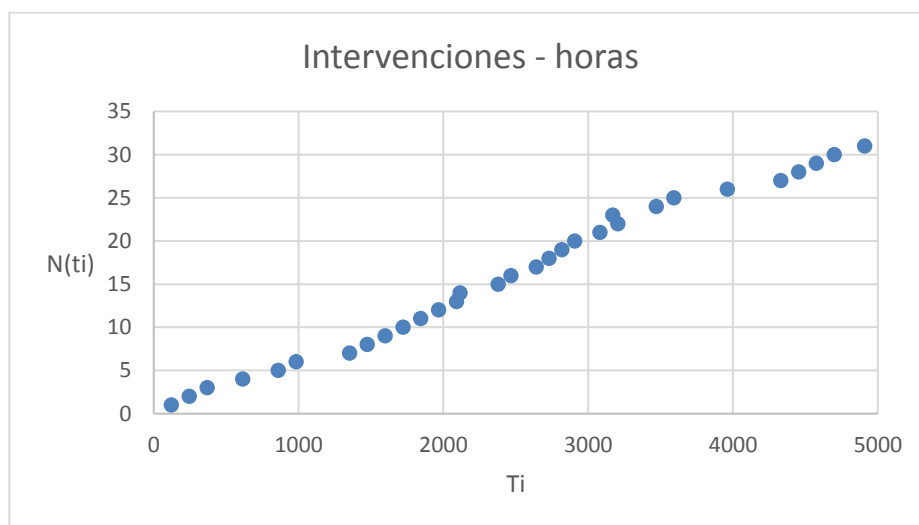


Figura 3-19. Diagrama de dispersión N(ti) - Ti

El diagrama de dispersión muestra una función lineal, por lo que se podría asumir que el tiempo entre intervenciones tiene aproximadamente el mismo valor o es estacionario, pero asumir esto puede llevar a error, porque eso irá en función del tipo de estudio que se esté realizando, paramétrico o no paramétrico.

En resumen, el diagrama de dispersión es un punto de partida que da información gráfica de lo existente, pero no es posible obtener más información relevante para tomar decisiones operacionales.

El objetivo de la técnica GAMM [12] es un análisis cualitativo y cuantitativo para intentar dar soporte a la toma de decisiones a nivel operacional usando de un diagrama de dispersión, como el mostrado anteriormente, pero añadiendo variables como: tipo de intervención, duración de la misma y el estado del equipo. La combinación de estas nuevas variables en un entorno gráfico dará nueva información para la toma de decisiones.

Para el desarrollo del análisis mediante GAMM se van a definir las siguientes variables:

- $N(t_i)$: Valor acumulado de intervenciones, T.
Los marcados con asterisco serán intervenciones preventivas
Los que no tienen asterisco son intervenciones correctivas.
- T_i : Valor acumulado de horas de funcionamiento, descontando las horas de intervención.
- Δt : Duración de la intervención, en horas.
- Det: Estado del equipo en la intervención.
Valor 1: Equipo en funcionamiento durante la intervención.
Valor 0: Equipo parado durante la intervención.

En la siguiente tabla se presentan las variables citadas anteriormente y se ha incluido el tiempo entre fallos (TBF – Time between failures), calculado considerando si existe detención del equipo durante la intervención.

- Cuando se detiene la máquina (Det=0) $\rightarrow TBF_i = T_i - T_{i-1} - \Delta t_{i-1}$
- Cuando no se detiene la máquina (Det=1) $\rightarrow TBF_i = T_i - T_{i-1}$

Tabla 3–12. Registro valores

i	N(ti)	Ti	ΔT	Det	TBF
1	14	2115	1	1	24,0
2	18	2731	2	0	87,5
* 3	22	3101	3	0	88,0
4	16	2467	1	1	88,0
5	19	2819	1	1	88,0
6	20	2907	0,5	1	88,0
7	23	3171	0,5	1	88,0
8	12	1968	2	0	120,0
9	6	984	2	0	122,0
10	8	1476	2	0	122,5
* 11	11	1845	3	0	122,5
12	28	4454	2	0	122,5
13	1	123	2	0	123,0
14	2	246	0,5	1	123,0
15	3	369	1	1	123,0
16	9	1599	1	1	123,0
17	10	1722	0,5	1	123
18	13	2091	0,5	1	123
19	25	3593	0,5	1	123
20	29	4577	1	1	123
21	30	4700	0,5	1	123
22	21	3083	2	0	175,5
23	17	2643	0,5	1	176
* 24	31	4911	16	0	210,5
25	4	615	2	0	245
26	5	861	1	1	246
27	15	2379	2	0	263
28	24	3470	1	1	299
29	26	3962	2	0	368,5
30	7	1353	0,5	1	369
31	27	4331	0,5	1	369

La tabla se ha ordenado de menor a mayor por el valor del TBF.

A continuación se va a estimar la función de fiabilidad, calculada usando algoritmos en base al método no paramétrico de Nelson Aalen [13], evaluada en el momento antes de la intervención. El estimador de Nelson Aalen [13] para la tasa acumulada de fallo se expresa con la ecuación:

$$Z(t) = \sum_v \frac{1}{n - v + 1}$$

donde $Z(t)$ es la tasa acumulada de fallo, n es el número total de intervenciones estudiadas y v es igual al parámetro i , que representa el orden secuencial de las intervenciones.

El GAMM estimador para la tasa acumulada de fallo se expresa en la siguiente ecuación:

$$z(t_i) = \begin{cases} Z(t_{i-1}) + \frac{1}{n - i + 1} & \text{si el evento } i \text{ es un fallo} \\ Z(t_{i-1}) & \text{en el resto de casos} \end{cases}$$

$$\text{Con } Z(t_0) = 0$$

Entonces, el estimador para la función de fiabilidad sale de la ecuación:

$$R(t_i) = e^{-Z(t_i)}$$

donde $R(t_i)$ es la función de fiabilidad y $Z(t_i)$ es la tasa acumulada de fallo.

Tabla 3–13. Resultados de $R(t_i)$ y $Z(t_i)$

i	N(ti)	Ti	ΔT	Det	TBF	Z(ti)	1/(n-i+1)	R(ti)	i	N(ti)	Ti	ΔT	Det	TBF	Z(ti)	1/(n-i+1)	R(ti)
1	14	2115	1	1	24,0	0	0,032	1,000	17	10	1722	0,5	1	123,0	0,082	0,067	0,921
2	18	2731	2	0	87,5	0	0,033	1,000	18	13	2091	0,5	1	123,0	0,082	0,071	0,921
* 3	22	3101	3	0	88,0	0,034	0,034	0,966	19	25	3593	0,5	1	123,0	0,082	0,077	0,921
4	16	2467	1	1	88,0	0,034	0,036	0,966	20	29	4577	1	1	123,0	0,082	0,083	0,921
5	19	2819	1	1	88,0	0,034	0,037	0,966	21	30	4700	0,5	1	123,0	0,082	0,091	0,921
6	20	2907	0,5	1	88,0	0,034	0,038	0,966	22	21	3083	2	0	175,5	0,082	0,100	0,921
7	23	3171	0,5	1	88,0	0,034	0,040	0,966	23	17	2643	0,5	1	176,0	0,082	0,111	0,921
8	12	1968	2	0	120,0	0,034	0,042	0,966	* 24	31	4911	16	0	210,5	0,207	0,125	0,813
9	6	984	2	0	122,0	0,034	0,043	0,966	25	4	615	2	0	245,0	0,207	0,143	0,813
10	8	1476	2	0	122,5	0,034	0,045	0,966	26	5	861	1	1	246,0	0,207	0,167	0,813
* 11	11	1845	3	0	122,5	0,082	0,048	0,921	27	15	2379	2	0	263,0	0,207	0,200	0,813
12	28	4454	2	0	122,5	0,082	0,050	0,921	28	24	3470	1	1	299,0	0,207	0,250	0,813
13	1	123	2	0	123,0	0,082	0,053	0,921	29	26	3962	2	0	368,5	0,207	0,333	0,813
14	2	246	0,5	1	123,0	0,082	0,056	0,921	30	7	1353	0,5	1	369,0	0,207	0,500	0,813
15	3	369	1	1	123,0	0,082	0,059	0,921	31	27	4331	0,5	1	369,0	0,207	1,000	0,813
16	9	1599	1	1	123,0	0,082	0,063	0,921									

Considerando las nuevas variables, se ha realizado un análisis gráfico cualitativo y cuantitativo, que reemplaza al anterior diagrama de dispersión (Figura 3-12) con las siguientes consideraciones:

- El diámetro de los globos van en función de la duración de la intervención.
- El color de los globos representa si la intervención se produjo por una avería que dejaba fuera

de servicio la instalación o no.

- El borde negro en los globos representa si el mantenimiento preventivo dejaba la instalación fuera de servicio o no.

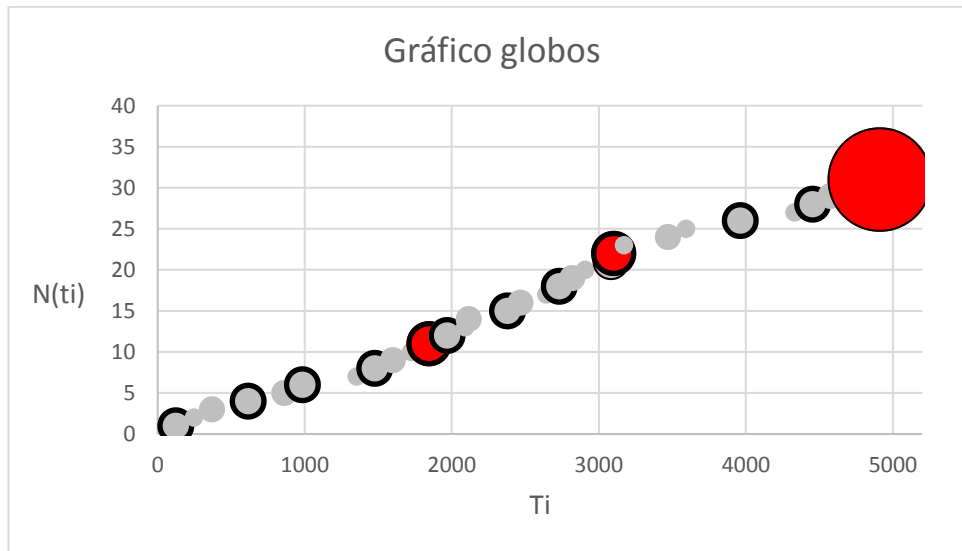


Figura 3-20. Diagrama de dispersión con nuevas variables

Observando el diagrama de dispersión de globo se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Permite ver la tendencia de la función del número acumulativo de intervenciones con respecto al tiempo. El comportamiento aproximado de la función $N(T_i)$ (lineal, cóncavo o convexo) determinará si el equipo/sistema está en etapa inmóvil o no estacionaria de la operación. Esto muestra la distribución temporal del tiempo entre intervenciones. Para un sistema estacionario, la función $N(T_i)$ es lineal; el tiempo entre intervenciones se distribuye según un determinado valor esperado y para los sistemas cuya función $N(T_i)$ es no lineal, cóncava o convexa, el tiempo entre intervenciones tiende a aumentar o disminuir dependiendo de T_i , respectivamente.
- Del punto anterior se deduce que hay intervenciones de mantenimiento preventivo programado periódicamente que no aportan valor ya que no han evitado en ningún caso la falla del equipo. Esto refuerza la decisión tomada de monitorizar parámetros de funcionamiento de la máquina para controlar su funcionamiento.
- Sobre la eficiencia y calidad de las intervenciones: la duración de cada intervención está representada por el tamaño de la burbuja. Esta variable ayuda a identificar aquellas intervenciones que están más allá de los tiempos medios de intervención, cuestionar si el horario de la carga de trabajo es correcto o si la desviación en los tiempos de ejecución se debe a factores externos como la falta de herramientas, a la espera de partes, la falta de formación del personal, etc.
- En un momento dado, después de una intervención correctiva por una avería en la máquina, se reducen las intervenciones en la misma, tanto preventivas como correctivas, y posteriormente se produce una falla importante en el equipo, lo que lleva a pensar que se tomó una mala decisión en ese período.
- Se realizan muchas operaciones de mantenimiento preventivo que obligan a dejar fuera de

servicio la máquina, reduciendo el tiempo disponible de la misma.

Con el método GAMM también se puede obtener un gráfico que relacione $R(t_i)$ con T_i que mostraría el nivel de fiabilidad existente en el equipo antes de la intervención.

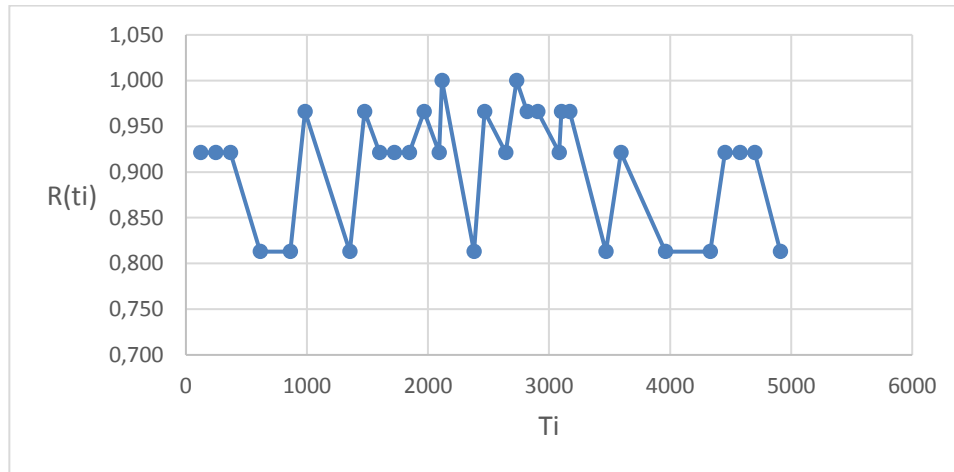


Figura 3-21. Diagrama estado fiabilidad

De este gráfico se puede deducir que se realizan muchas intervenciones en el equipo, cuando aún posee un nivel de fiabilidad alto. También se puede concluir que hay mucha variación en el nivel de fiabilidad del equipo a lo largo del tiempo, siendo este equipo crítico para el funcionamiento de la fábrica

El objetivo del mantenimiento preventivo debe ser mantener el equipo en niveles de fiabilidad cercanos a uno y por lo tanto, que no presente oscilaciones como en el equipo a estudio. Las intervenciones correctivas en periodos de baja fiabilidad es un síntoma de un mantenimiento preventivo mal programado o ejecutado.

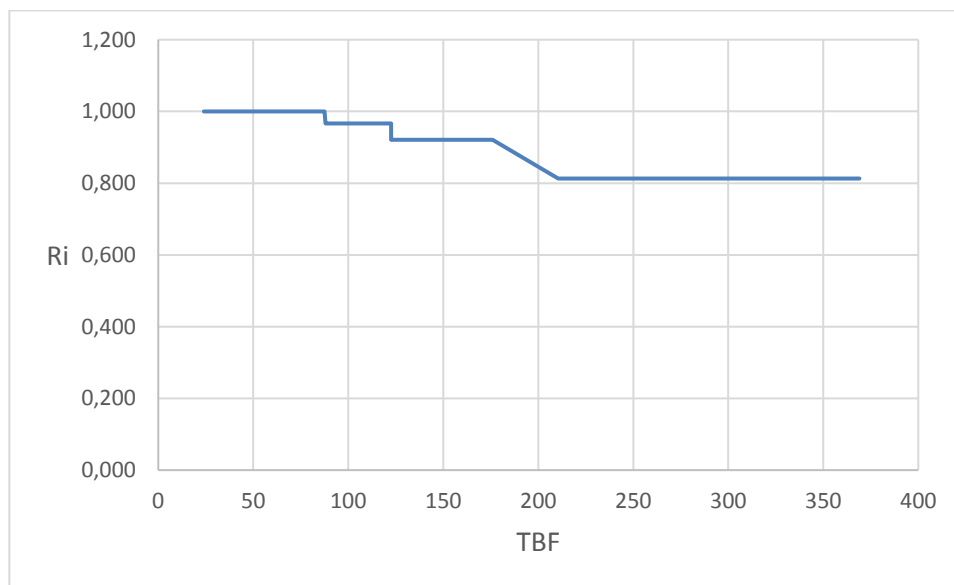


Figura 3-22. Diagrama función de fiabilidad

Como se puede observar en el diagrama de la función de fiabilidad, esta decrece con el tiempo hasta niveles cercanos al 80%, un nivel bajo para una instalación crítica.

A continuación se van a realizar simulaciones mediante técnica GAMM, considerando que los equipos para controlar predictivamente la máquina están en funcionamiento.

Para ello, en primer lugar se va a incluir en la gráfica de globos, un seguimiento del sensor de vibraciones para el que se tiene la consideración de la norma ISO 10816 para el establecimiento del límite del valor de vibración en mm/seg para este tipo de máquina. De la norma se ha establecido como 5 el valor máximo.

Para el diseño de la nueva gráfica se ha considerado:

- El valor de la vibración va a ir aumentando hasta niveles altos justo antes del fallo y paro de planta.
- De color naranja la monitorización de las vibraciones en los momentos en las que anteriormente se realizaba alguna operación de mantenimiento.
- En rojo, cuando el valor de vibración alcanza el umbral establecido, en ese momento se realiza mantenimiento programado y se devuelve la máquina a su origen.

Para la realización del estudio se va a partir de la hipótesis de que al tener la máquina en una supervisión continua, la fiabilidad de la misma aumentará por dos motivos:

- El control de la misma aumenta.
- Se podrá observar la tendencia de la máquina y programar reparaciones que no impliquen una parada de la producción.

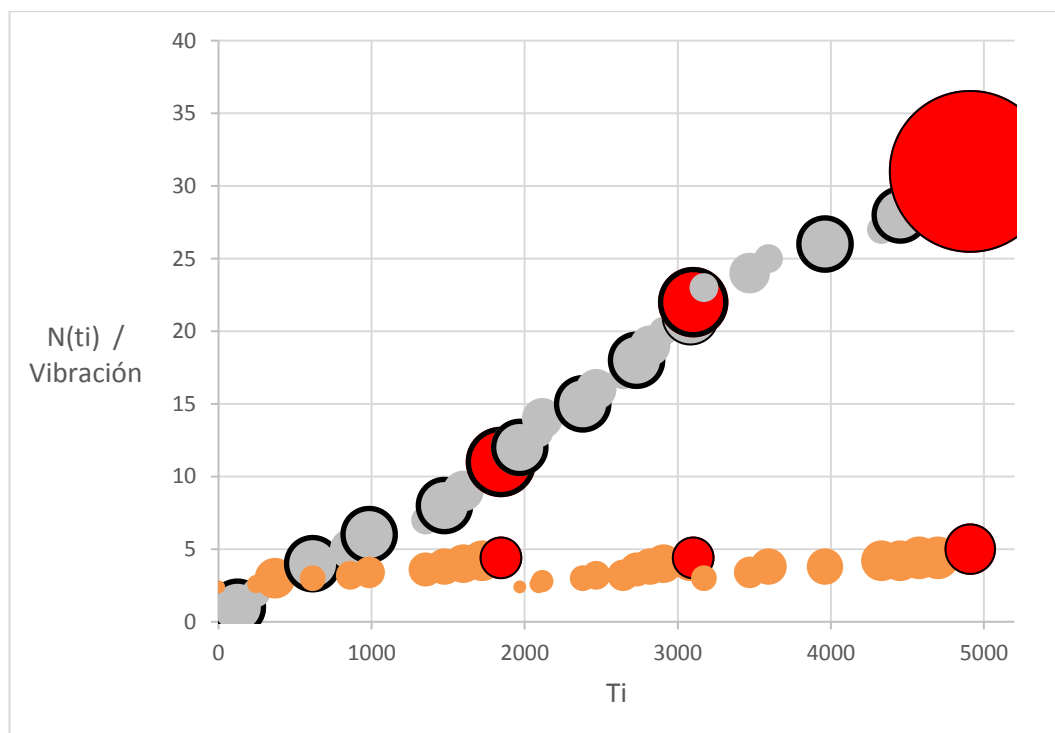


Figura 3-23. Valor vibración

En segundo lugar se va a incluir en la gráfica de goblos, un seguimiento del sensor de temperatura, para el que se van a establecer los límites de aviso en función de la experiencia en otros ventiladores, fijando como 70°C el valor de alarma para los rodamientos.

Para el diseño de la nueva gráfica se ha considerado:

- El valor de la temperatura va a ir aumentando hasta niveles altos justo antes del fallo y paro de planta.
- De color naranja la monitorización de la temperatura en los momentos en las que anteriormente se realizaba alguna operación de mantenimiento.
- En rojo, cuando el valor de temperatura alcanza el umbral establecido, en ese momento se realiza mantenimiento programado y se devuelve la máquina a su origen.

Para la realización del estudio se va a partir de la misma hipótesis que en el caso anterior, es decir, que con los nuevos controles la fiabilidad de la máquina aumentará por los motivos ya expuestos anteriormente.

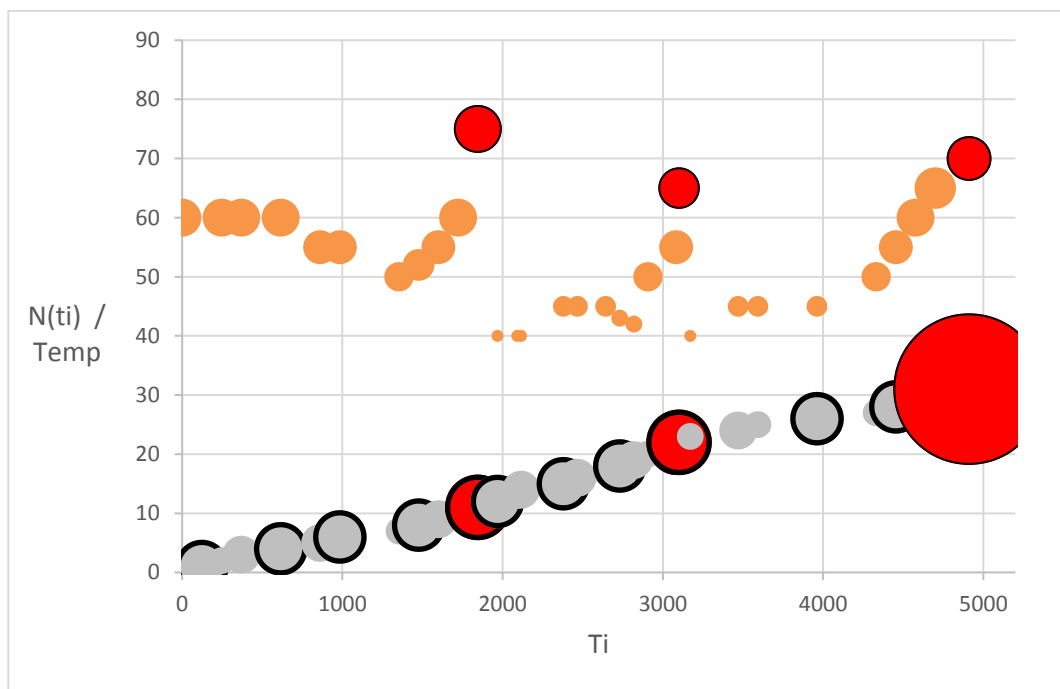


Figura 3-24. Valor temperatura

En tercer y último lugar se va a incluir en la gráfica de goblos, un seguimiento de los sensores de medida de presión absoluta. Para el control de los mismos se va a partir de las características técnicas dadas por el fabricante del ventilador, en el que se especifica que la diferencia de presión (en nuestro caso presión negativa o depresión) debe ser de -196 mmH₂O, admitiendo un 10% de margen para nuestra máquina.

Número de la marcha	1
Designación	funcionamiento
Caudal en aspiración	470000 m3/h
Temperatura en la aspiración	190 °C
Presión en la aspiración	-251 mmH2O
Presión en la impulsión	-55 mmH2O
Densidad de referencia	1.3 kg/m3
Temperatura de referencia	0 °C
Presión barométrica de referencia	10328.7 mmH2O

Figura 3-25. Datos técnicos ventilador

Para el diseño de la nueva gráfica se ha considerado:

- El valor de la depresión va a ir disminuyendo con el desgaste del rotor y la presión en la aspiración y la impulsión se van a ir igualando.
- Para la representación gráfica, los valores de la depresión se van a representar en positivo.
- De color naranja la monitorización de la depresión en los momentos en las que anteriormente se realizaba alguna operación de mantenimiento.
- En rojo, cuando el valor de temperatura alcanza el umbral establecido, en ese momento se realiza mantenimiento programado y se devuelve la máquina a su origen.

Para la realización del estudio se va a partir de la misma hipótesis que en el caso anterior, es decir, que con los nuevos controles la fiabilidad de la máquina aumentará por los motivos ya expuestos anteriormente.

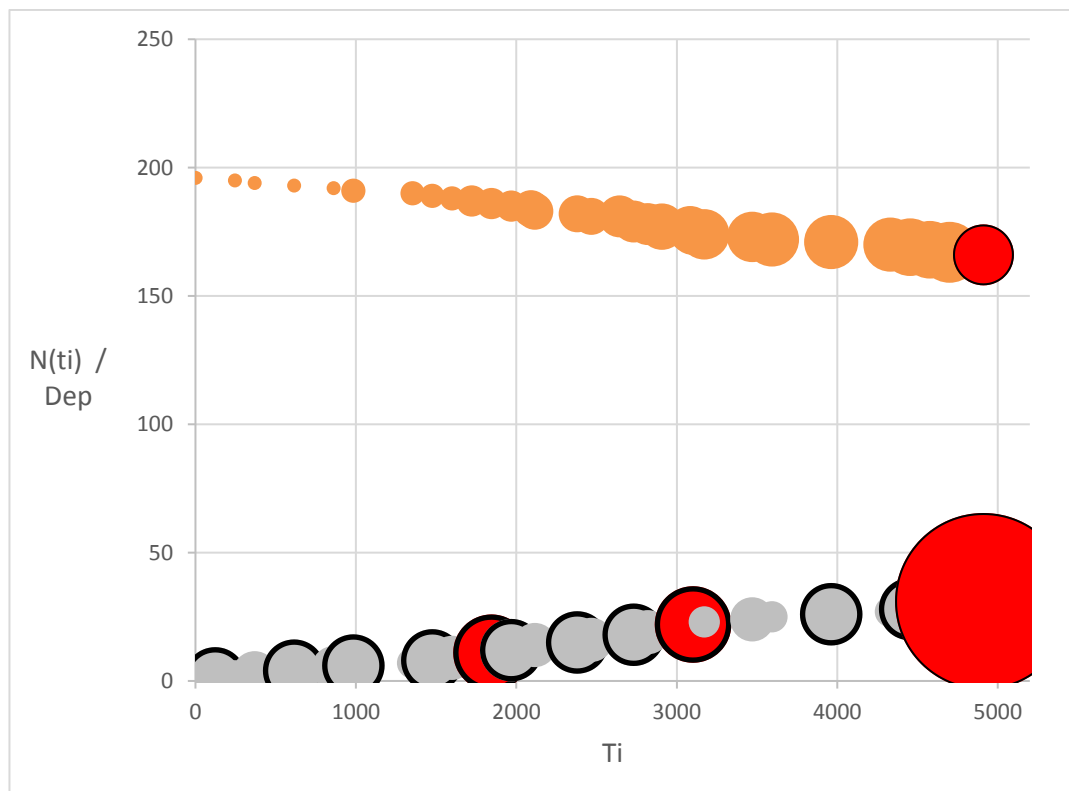


Figura 3-26. Valor temperatura

Observando las gráficas anteriores, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El plan de mantenimiento actual diseñado y ejecutado para el equipo en estudio no es el adecuado debido a lo que se ha explicado anteriormente. Hay operaciones que no aportan valor ni hacen ganar en fiabilidad a la máquina.
- Incluir las medidas propuestas en el RCM mejoraría en gran medida la fiabilidad de la máquina, ya que un seguimiento en continuo de la instalación mediante este tipo de sensores, permitiría anticipar el fallo y programar correctivos sin que se produzcan paros inesperados de la máquina, algo que evitaría paradas en la producción. En el caso del fallo que produjo la parada de 16 horas, a través de los sensores de presión se podría haber seguido la evolución de la misma.
- La monitorización de parámetros aportan un gran valor en los procesos productivos, reduciendo costes por paros imprevistos y por mantenimientos innecesarios.
- La aplicación del método GAMM ha determinado y caracterizado gráficamente no sólo las deficiencias del ventilador, que produjo bastante parada de producción, sino también las deficiencias existentes en mantenimiento, facilitando la toma de decisiones.
- El análisis comparativo de los gráficos GAMM correspondiente al ventilador ha determinado aspectos como: tendencia de revisiones, desviación en la frecuencia de revisiones preventivas, función de fiabilidad, eficiencia de las operaciones de mantenimiento, el impacto de la falta de disponibilidad, la calidad de las revisiones realizadas o la calidad del uso y el funcionamiento del equipo por parte del personal responsable de ello.

3.4.1 Conclusiones del GAMM

Sobre el modo de fallo estudiado, se ha podido comprobar que el mantenimiento que se le realiza actualmente al equipo no aporta valor y no asegura la fiabilidad de la máquina, asumiéndose un gran impacto total.

El uso de técnicas GAMM, hace muy visibles los posibles puntos de mejora y ayudan a realizar una foto detallada de la situación. Ha sido muy productivo, realizar comparativas y simulaciones gráficas de los posibles resultados aplicando las mejoras para el seguimiento en continuo de la máquina estudiada. Se identifica rápidamente el potencial de mejora y ayuda a la toma de decisión.

Realizar análisis gráficos de los equipos es una herramienta muy poco utilizada y extendida en el mantenimiento, siendo algo que aporta mucho valor.

4 ANÁLISIS COSTE RIESGO BENEFICIO

EL análisis coste riesgo beneficio se puede definir como [15] "una metodología que permite lograr una combinación óptima entre los costes asociados al realizar una actividad, tomar decisiones y los logros (beneficios) esperados que dichos aspectos generan, considerando el riesgo que involucra la realización o no de tal actividad o inversión, incluyendo en la misma el hecho de disponer o no de los recursos para esta". En este capítulo, se va a realizar una comparativa entre el mantenimiento existente actual y el mantenimiento con las mejoras adoptadas.

4.1 Cálculo del riesgo e impacto con el mantenimiento actual.

Para crear la curva de riesgo, se necesita evaluar los riesgos asociados a la ocurrencia de los fallos y su reducción o aumento a través de operaciones de reparación (si es posible) o de sustitución (si no es posible la reparación) en los equipo que componen el proceso. Para realizar este cálculo su usara una formulación muy parecida a la utilizada en el análisis de criticidad:

$$R(t) = P(t) \times C(t), \text{ donde:}$$

- R(t) es el riesgo de que ocurra un fallo
- P(t) es la probabilidad de que ocurra
- C(t) es la consecuencia del fallo

Para determinar la probabilidad del fallo, se debe considerar si se trata de un activo reparable o no. Esto se diferencia ya que en el caso de los equipos reparables tras sufrir un fallo se pueden reparar, cosa que no sucede con los equipos no reparables que se deben sustituir en el primer fallo.

En el caso que se ha estudiado, el ventilador es un equipo reparable, por lo que se ha considerado el tiempo operative entre fallos para el cálculo de la función que la caracteriza.

4.1.1 Función de distribución.

Para obtener la función de distribución, en primer lugar se debe calcular el tiempo medio entre fallos (MTBF). De los datos utilizados para el estudio mediante técnica GAMM se puede obtener el TBF, por lo que para clacular el MTBF se procederá como sigue:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TBF_i}{n}$$

De donde se obtiene que el MTBF= 68,20 días.

A continuación se debe calcular la tasa de fallo, λ que se obtendrá de la ecuación

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

de donde se obtiene que $\lambda=0,0146$.

La función de distribución $F(t)$ queda como sigue:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,0146t}$$

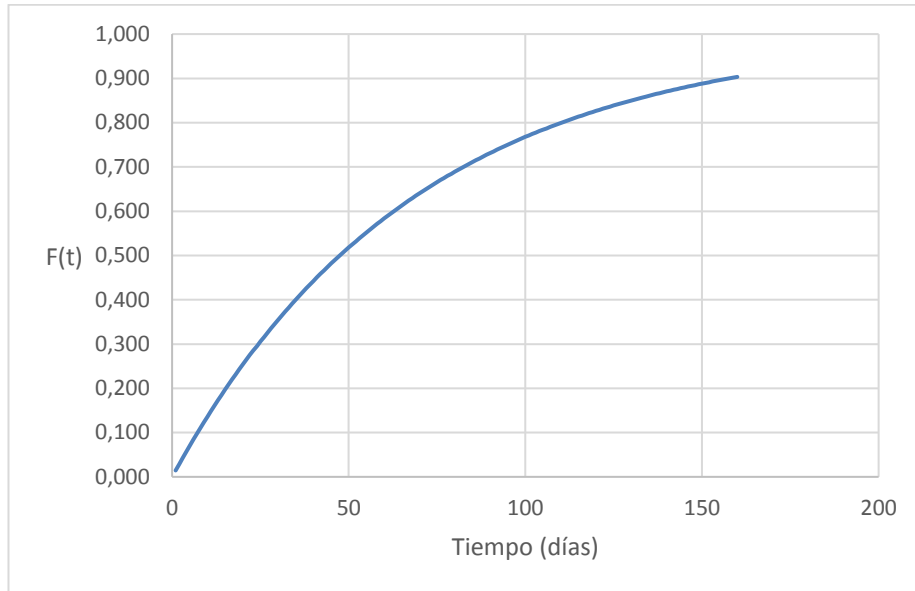


Figura 4-1. Función de distribución

4.1.2 Consecuencias.

Para cuantificar las consecuencias, es necesario estudiar todas las causas que provocarían un evento no deseado. La fórmula que representa el coste de las posibles consecuencias es:

$$C(f) = C_e + C_s + C_a$$

Donde:

- $C(f)$ es la consecuencia total de un fallo.
- C_e es la consecuencia económica.
- C_{es} es la consecuencia en aspectos de seguridad.
- C_a es la consecuencia en aspectos de medio ambiente

A continuación se va a proceder a desgranar cada factor de la ecuación $C(f)$.

Consecuencias económicas.

Para calcular las consecuencias económicas, se debe cuantificar las pérdidas asociadas a la producción:

$$C_e = CPP + CR$$

CPP es el coste por la pérdida de producción y se calculan con la ecuación:

$$CPP = CI + PP$$

donde:

- CI es el coste de improductividad. Es el coste de no producir y tener todos los medios para ello (personal, suministros, etc.).
- PP es el coste por pérdida de producción.

CR es el coste de reparación y vendrá calculado a través de la ecuación:

$$CR = CR_R + CMO_R$$

donde:

- CR_R es el coste del repuesto para la reparación.
- CMO_R es el coste de la mano de obra para la reparación.

Consecuencias económicas, Ce

$$2.1 \quad Ce = CPP + CR = 476.030 \quad \text{€}$$

COSTOS POR PÉRDIDAS DE PRODUCCIÓN

$$CPP = CI + PP$$

$$= 361.900$$

Coste de improductividad	CI	=	118.800	€
Pérdida de producción	PP	=	243.100	€

Consecuencias en seguridad.

Para valorar las consecuencias en seguridad, es necesario saber los posibles daños que puede sufrir el personal de la instalación ante un fallo de la máquina. En el caso de estudio ese valor es 0.

Consecuencias medio ambiente.

En el caso en estudio, ante un fallo de la máquina se podrían producir emisiones fugitivas por la campana de aspiración, pudiendo provocar una sanción económica por incumplimiento de la Autorización Ambiental Integrada (AAI). Se ha consultado con el Responsable de Calidad y Medio Ambiente para cuantificar esa posible sanción y los efectos que tendría.

Consecuencias ambientales, Ca

$$2.3 \quad Ca = 200.000 \quad \text{€}$$

Sanción económica	CS	=	200.000	€
-------------------	----	---	---------	---

4.1.3 Curva de riesgo.

Una vez que se han obtenido los datos necesarios para la curva de riesgo, es decir, la función de distribución y los costes, se calcula y representa a continuación la misma.

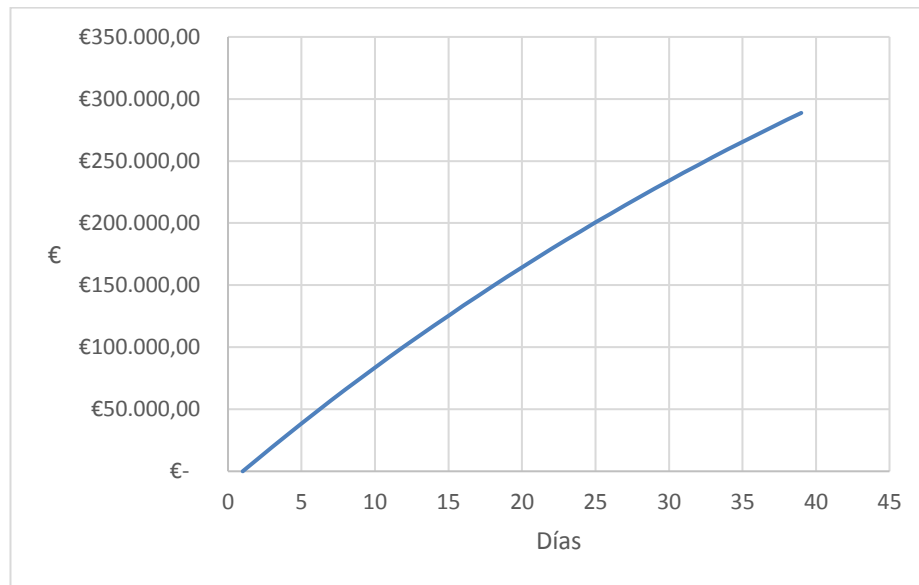


Figura 4-2. Curva de riesgo

Una vez analizado el riesgo coste beneficio, es aún más evidente la necesidad de abordar las medidas propuestas en el análisis mediante RCM.

A continuación, se va a realizar el cálculo de costes, comparando la situación actual de mantenimiento, con la situación que se tendrá una vez se aborden las medidas propuestas en el análisis mediante RCM, es decir, se comparará los costes de un modelo basado en la sustitución parcial preventiva con reparaciones mínimas, con un modelo basado en condición, ya que del estudio RCM las medidas propuestas van encaminadas a un mantenimiento basado en condición.

4.1.4 Cálculo de costes e impacto total.

El cálculo de costes es fundamental para determinar si la inversión que se va a realizar, resultante del RCM, permitirá obtener los beneficios esperados. Para ello se debe cuantificar todas las acciones de mantenimiento que se van a realizar con el objetivo de que el equipo pueda estar la mayor parte del tiempo realizando su función requerida. En el caso en estudio, además de optimizar el mantenimiento y sus costes, se pretende reducir el tiempo de para imprevisto con la inversión. Para el mismo, se va a utilizar un modelo de sustituciones parciales con reparaciones mínimas, que es el más aproximado a lo que se realiza.

Modelo de sustituciones parciales con reparaciones mínimas.

Este modelo [16] se basa en que el reemplazo o la sustitución total del sistema (ST) se realiza después de $(k-1)$ sustituciones preventivas parciales SPP. Para un sistema sujeto a $(i-1)$ SPP con $(i < k)$, se procederá a la SPP cuando se alcance la edad T_i , desde la última SPP (o sustitución total en el caso $i=1$). En caso de fallo se realiza una reparación mínima, reparación que es más económica pero que no afecta a la tasa de fallo del sistema, es decir, no restaura a su valor original.

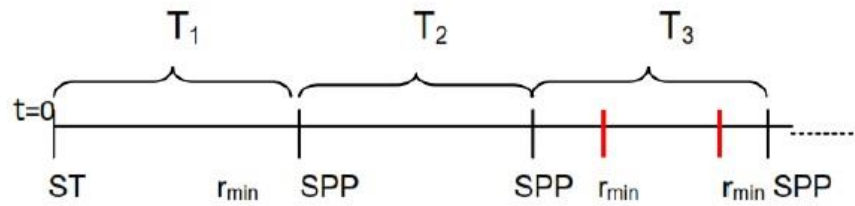


Figura 4-3. Modelo Spp con reparaciones mínimas.

En el modelo, los parámetros a considerar son:

- Cpp: Coste de la SPP
- Cs: Coste de la ST
- Crm: Coste de la reparación mínima
- Ti: Frecuencia para la SPP
- F(t): Función de distribución de la probabilidad de tiempo hasta el fallo.
- $\lambda_i(t)$: Tasa de fallo en el momento t.
- k: SPP en el cual se hace la ST.
- CTE (k...Tk): Coste total esperado.

Coste de la sustitución parcial preventiva (Cpp).

El coste de la Spp se puede expresar del modo siguiente:

$$C_{pp} = CR_m + CMO_m$$

Donde:

- CR_m : Es el coste del repuesto y el material necesario para realizar la sustitución.
- CMO_m : es el coste de la mano de obra necesaria para realizar la intervención de sustitución.

Costes Sustitución Parcial Preventiva, Cpp			
3.1 Cpp = CR_M+CMO_M		=	38.400
Costos de los repuestos	CR _M	=	2.400 €
Costo de mano de obra	CMO _M	=	36.000 €

Coste de la reparación mínima (Crm).

Para calcular el coste de la reparación mínima es necesario calcular el coste que ha provocado las reparaciones que se le han efectuado al equipo cuando el mismo ha fallado.

$$C_{rm} = CR_m + CMO_m$$

	Costes Reparación Mínima, C_{rm}		
	3.2 $C_{rm} = C_{RM} + C_{MO_M}$		= 19.650
Costos de los repuestos	C_{RM}	= 6.600 €	
Costo de mano de obra	C_{MO_M}	= 18.000 €	

Coste de la sustitución total (C_s).

El coste de la sustitución total vendrá dado por el valor total del equipo más la mano de obra necesaria para su sustitución.

	Costes Sustitución Total, C_s		
Costo sustitución total	3.1 $C_s =$		= 105.800

Coste total esperado (CTE).

El coste total esperado viene dado por la siguiente expresión:

$$CTE(k, T_1, \dots, T_K) = \frac{(k-1) * C_{pp} + C_s + C_{rm} * \sum_{i=1}^k N(T_i)}{\sum_{i=1}^k T_i}$$

En la formulación, el problema a resolver sería encontrar el número óptimo de intervenciones parciales con la frecuencia óptima.

Impacto total

Una vez que se obtienen las curvas de riesgo y coste, se deben sumar para obtener la curva de impacto total, que se representa a continuación. Lo óptimo es buscar el punto donde menor impacto total existe, que es donde se cruzan la curva de riesgo y la curva de costes.

En la actualidad, como se puede comprobar en la tabla anexa de cálculos, la frecuencia de mantenimientos es cada 28 días, asumiendo un riesgo muy elevado y por ende, un alto impacto total, por lo que queda claro que es necesario la modificación del plan de mantenimiento.

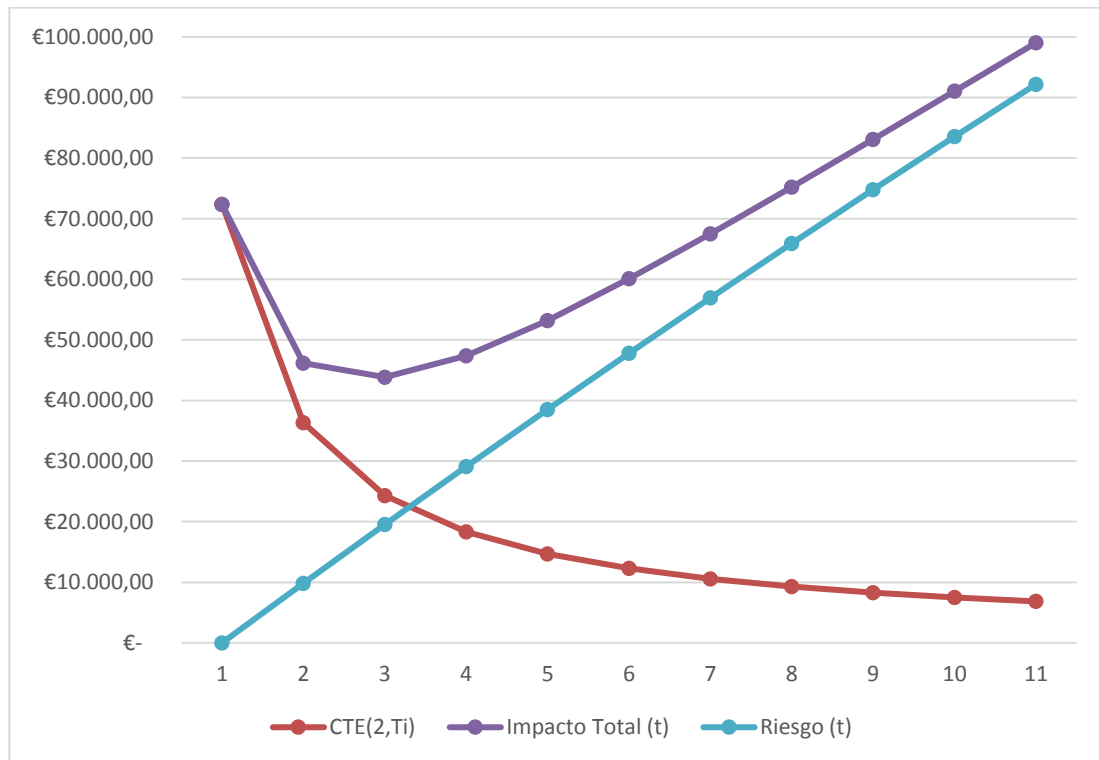


Figura 4-4. Curvas.

En las simulaciones realizadas y atendiendo al ritmo de producción de la fábrica, se observa que lo óptimo para un mantenimiento de este modelo sería realizar dos revisiones cada tres días, algo que no obstante se busca mejorar a raíz del RCM realizado, pasando a realizar un mantenimiento basado en condición.

4.2 Cálculo del riesgo e impacto con las mejoras adoptadas.

Para el cálculo de todos los datos necesarios para evaluar el mantenimiento con las mejoras adoptadas se va a proceder del mismo modo que con el anterior. En este caso, se va a hipotizar que con las mejoras adoptadas la fiabilidad de la máquina aumenta y además se pueden programar las intervenciones no provocando parada de la producción. Por todo ello, se va a partir de un fallo cada 5000 horas de funcionamiento.

4.2.1 Función de distribución.

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TBF_i}{n}$$

De donde se obtiene que el MTBF= 208 días.

A continuación se debe calcular la tasa de fallo, λ que se obtendrá de la ecuación

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

de donde se obtiene que $\lambda=0,0048$.

La función de distribución $F(t)$ queda como sigue:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,00486t}$$

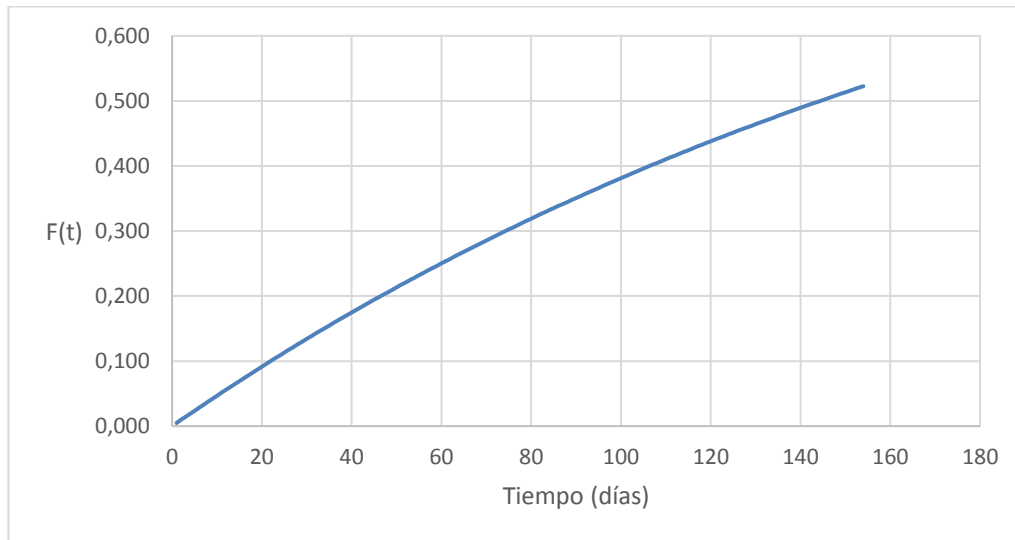


Figura 4-5. Función de distribución

4.2.2 Consecuencias.

Consecuencias económicas.

Para calcular las consecuencias económicas, se debe cuantificar las pérdidas asociadas a la producción:

$$C_e = CPP + CR$$

Consecuencias económicas, C_e

$$2.1 \quad C_e = CPP + CR = 376.280 \quad \text{€}$$

COSTOS POR PÉRDIDAS DE PRODUCCIÓN

$$CPP = CI + PP = 263.200$$

Coste de improductividad	CI	=	86.400	€
Pérdida de producción	PP	=	176.800	€

Consecuencias en seguridad.

Para valorar las consecuencias en seguridad, es necesario saber los posibles daños que puede sufrir el personal de la instalación ante un fallo de la máquina. En el caso de estudio ese valor es 0.

Consecuencias medio ambiente.

En el caso en estudio, ante un fallo de la máquina se podrían producir emisiones fugitivas por la campana de aspiración, pudiendo provocar una sanción económica por incumplimiento de la Autorización Ambiental Integrada (AAI). Se ha consultado con el Responsable de Calidad y Medio Ambiente para cuantificar esa posible sanción y los efectos que tendría.

Consecuencias ambientales, Ca			
	2.3 Ca	=	200.000 €
Sanción económica	CS	=	200.000 €

4.2.3 Curva de riesgo.

Una vez que se han obtenido los datos necesarios para la curva de riesgo, es decir, la función de distribución y los costes, se calcula y representa a continuación la misma.

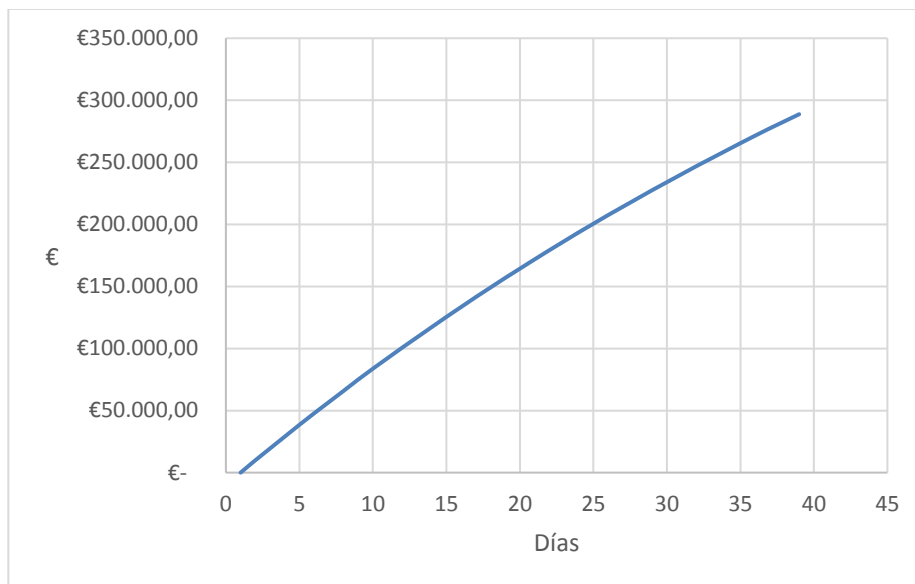


Figura 4-6. Curva de riesgo

En la curva de riesgo, ya se puede apreciar que ha disminuido el riesgo en función del tiempo, debido que se considera, en base a la experiencia, que con el nuevo Sistema de mantenimiento aumenta el MTBF.

4.2.4 Cálculo de costes e impacto total.

Para el cálculo de costes se va a utilizar el mismo modelo anterior.

Modelo de sustituciones parciales con reparaciones mínimas.

Coste de la sustitución parcial preventiva (Cpp).

Para este apartado, sólo se tendrá en cuenta en este caso el coste del mantenimiento de los equipos de medida.

$$C_{pp} = CR_m + CMO_m$$

Costes Sustitución Parcial Preventiva, Cpp

		3.1 Cpp = CR_M+CMO_M	=	2.736
Costos de los repuestos	CR _M	= 2.400	€	
Costo de mano de obra	CMO _M	= 336	€	

Coste de la reparación mínima (C_{rm}).

$$C_{rm} = CR_m + CMO_m$$

Costes Reparación Mínima, C_{rm}

		3.2 C_{rm} = CR_M + CMO_M	=	19.650
Costos de los repuestos	CR _M	= 6.600	€	
Costo de mano de obra	CMO _M	= 18.000	€	

Coste de la sustitución total (C_s).**Costes Sustitución Total, C_s**

Costo sustitución total	3.1 C_s =	=	105.800
-------------------------	----------------------------	---	---------

Coste total esperado (CTE).

$$CTE(k, T_1, \dots, T_K) = \frac{(k-1) * C_{pp} + C_s + C_{rm} * \sum_{i=1}^k N(T_i)}{\sum_{i=1}^k T_i}$$

Impacto total

A continuación se muestra la curva de impacto total, riesgo y coste. En ella, se puede observar claramente que aplicando las medidas de mejora en el mantenimiento tanto la curva de riesgo como la de costos de mantenimiento discurren por valores más bajos.

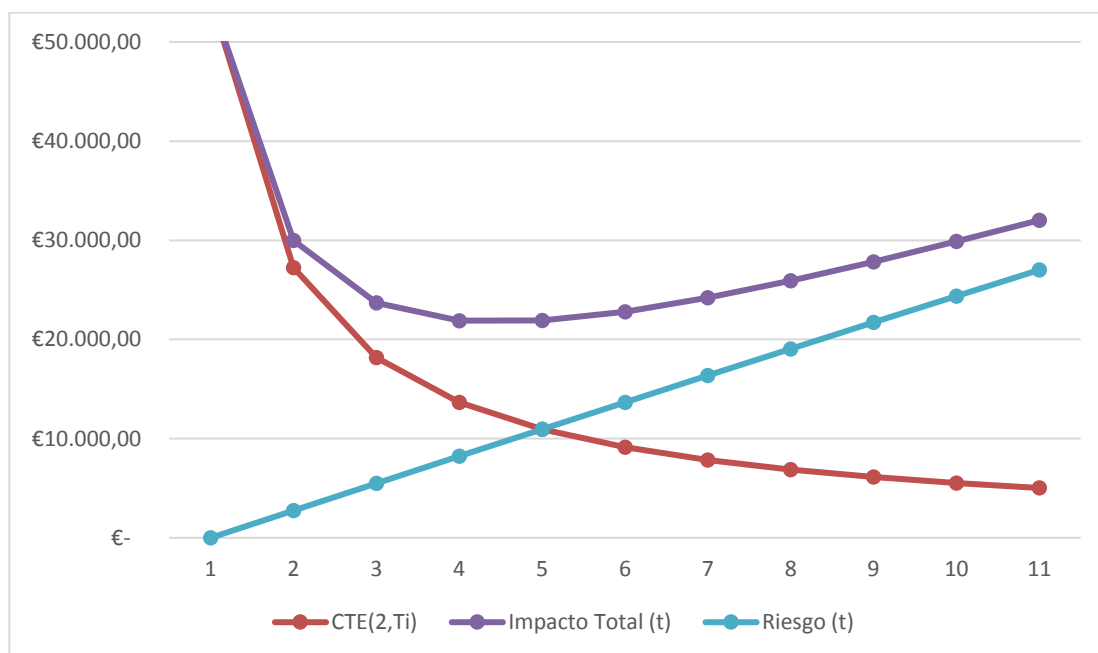


Figura 4-7. Curvas.

4.3 Conclusiones del RCB.

Tras analizar exhaustivamente las consecuencias asociadas a la ocurrencia de estos fallos y, teniendo en consideración los costes de las medidas preventivas que se podrían implementar, se evidencia que es una mejora sustancial implementarlas.

El análisis coste riesgo beneficio es una herramienta muy útil para ver la rentabilidad de las mejoras a adoptar y una gran ayuda para la toma de decisiones.

Se ha podido comprobar que implantando el nuevo plan de mantenimiento con las mejoras adoptadas se ahorrarían 14.000€ anuales en mantenimiento. Además el impacto total bajo estas condiciones sería de 21.900 € más bajo que en el punto óptimo con el plan anterior en 22.000€. Comparada con el plan anterior y que se realizaba, un impacto total de 200.000€ menos.

5 CONCLUSIONES

Una vez finalizado el trabajo, se pasan a detallar las conclusiones obtenidas en base al objetivo propuesto con el mismo.

1. Tras analizar los distintos modelos de gestión de mantenimiento y una vez detallado las innovaciones de cada uno de ellos, se seleccionó el modelo de Adolfo Crespo 2007, ya que era el que mejor cubría los puntos a estudiar del caso propuesto, además de ser un modelo ampliamente implantado en grandes empresas españolas.
2. La priorización de los equipos atendiendo a su nivel de criticidad es una herramienta que ayuda al servicio de Mantenimiento en la toma de decisiones a cerca de diferentes aspectos. El tipo de mantenimiento a realizar a cada equipo o sistema puede establecerse atendiendo a su índice de criticidad. El índice de criticidad obtenido, permite establecer la prioridad para la programación en el análisis de la planta. En caso de coincidencia en el tiempo tanto de correctivos como de preventivos y no disponer de suficientes recursos, será lógico lanzar antes los que afecten al equipo con mayor índice de criticidad. El nivel de criticidad es el mejor punto de partida para decidir los proyectos de mejora o renovación de las instalaciones, ya que permite focalizar los planes de inversión sobre el equipamiento de mayor nivel de criticidad. Muchas de estas mejoras, por ejemplo instalar redundancia, reducirán a su vez el índice de criticidad. El nivel de criticidad es un indicador de mantenimiento que, aislado o combinado con otros indicadores, resulta ser una herramienta útil para mejorar la gestión global del mantenimiento. Uno de los criterios que puede ayudar a la toma de decisiones sobre la necesidad de externalizar el mantenimiento, tanto tipo como alcance, de ciertos equipos es sin duda el nivel de criticidad. El estudio de criticidad permite potenciar la formación del personal de mantenimiento ya que se puede diseñar un plan de formación basado en las necesidades reales de la instalación. La lista jerarquizada de los equipos y sistemas obtenida del análisis de criticidad, ayuda a establecer la lista de repuestos necesarios que deben existir en el almacén de mantenimiento y optimizar su inmovilizado.
3. Con el análisis de criticidad se ha jerarquizado los activos de la Acería en tres niveles, obteniendo que sólo dos máquinas de la Acería son críticas, un 4% del total de ellas. Del mismo análisis, se destaca como máquina crítica una de las que produjo un fallo importante en la fábrica. El otro equipo que ha salido crítico son las mangueras del Horno de fusión, máquina a la que es conveniente realizar el mismo estudio que se ha realizado en este trabajo. A partir del análisis de criticidad se toma la decisión de realizar un RCM al ventilador Booster.
4. Del análisis de criticidad se destaca que la mayoría (un 90%) de máquinas de la Acería no son críticas, ya que o bien tienen redundancia con otra máquina o su impacto es bajo.
5. Es importante a la hora de realizar un análisis de criticidad contar con la opinión de todos los actores de una empresa (seguridad, medio ambiente, producción), ya que cada uno tiene su punto de vista y le da peso a un factor u otro. A su vez, ponderar correctamente estos factores va a hacer que el análisis de criticidad de resultados fiables y que se puedan coger como base para aplicar posteriores técnicas de mantenimiento.

6. Sobre el equipo crítico que se ha analizado mediante RCM los modos de fallos, sus efectos y sus causas se ha obtenido como resultado una serie de tareas a realizar por máquina o elemento al que se le ha aplicado, es decir un plan de mantenimiento ordenado, sin embargo, el plan de mantenimiento está “vivo”, es necesario revisarlo de vez en cuando por si las condiciones de operación han cambiado, si se han producido inversiones en los elementos que reduzcan su criticidad, como por ejemplo rediseños, duplicidad de instalaciones..., esto afecta enormemente a la criticidad de las instalaciones y por tanto al estudio RCM. EL RCM y los planes de mantenimiento se deben revisar con periodicidad, para ver, no sólo su efectividad sino también su necesidad.
7. Para la realización del RCM se ha debido realizar una amplia recogida de datos de la empresa y conta con actores de la producción, desde operarios a directores, para tener una foto correcta de lo que se está realizando.
8. Del resultado del RCM se destaca que la mayoría de las tareas a acometer van encaminadas a la monitorización de máquinas para obtener de este modo una mayor fiabilidad de la máquina. Es importante este punto ya que cada vez se tiende más a utilizar este tipo de herramientas, dejando de lado las revisiones diarias realizadas por personal de mantenimiento o producción. Esto, además de aumentar la fiabilidad de la máquina, lleva a una reducción de costes de mantenimiento como se puede constatar posteriormente en el RCB. Las decisiones tomadas van encaminadas a eliminar tareas preventivas que no aportan valor y sustituirlas por monitorización en continuo del máquina.
9. Sobre uno de los modos de fallo, se pudo comprobar, mediante técnica GAMM, que el mantenimiento que se le realiza actualmente al equipo es deficiente y no asegura la fiabilidad de la máquina, asumiéndose un gran impacto total.
10. El uso de técnicas GAMM, hace muy visibles los posibles puntos de mejora y ayudan a realizar una foto detallada de la situación. Ha sido muy productivo, realizar comparativas y simulaciones gráficas de los posibles resultados aplicando las mejoras para el seguimiento en continuo de la máquina estudiada. Se identifica rápidamente el potencial de mejora y ayuda a la toma de decisión.
11. A través de un análisis coste riesgo beneficio, se ha podido comprobar que implantando el nuevo plan de mantenimiento con las mejoras adoptadas se ahorrarían 14.000€ anuales en mantenimiento. Además el impacto total bajo estas condiciones sería de 21.900 € más bajo que en el punto óptimo con el plan anterior en 22.000€. Comparada con el plan anterior y que se realizaba, un impacto total de 200.000€ menos.
12. Se concluye que las acciones de mantenimiento a adoptar son muy positivas para la empresa, dado que, reduciría los costes de mantenimiento y bajara la posibilidad de fallo de la máquina.
13. La implantación de medidas predictivas debe ser la tónica común para los tiempos actuales, tiempos de la industria 4.0.

6 FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Como finalización de este trabajo, se puede concluir que existen múltiples vías para poder continuar con el análisis aquí realizado, aplicándolo a ámbitos similares o profundizando sobre los planteamientos aquí avanzados, como por ejemplo:

1. Plantear el análisis de los modos de fallo sobre el resto de los equipos que salieron críticos en el estudio, y establecer una estrategia de mantenimiento en el resto, en función a su criticidad. Para ello, se hará un análisis similar al planteado en este trabajo.
2. Establecer protocolos de mantenimiento sobre equipos genéricos, con el objetivo de poder extrapolar aquellos a otras plantas de generación similares.
3. Realizar seguimiento tanto de la fiabilidad de la planta a través de indicadores, para estudiar desde su evolución y afrontar posibles cambios de estrategia de mantenimiento. Para ello, la implementación de sistemas de registro que estén actualizados debe ser fundamental. A través del mismo se podrá obtener información de la evolución de las decisiones adoptadas.
4. Realizar un seguimiento del modo de fallo sobre el que se ha centrado el trabajo, con el objetivo de confirmar que el criterio escogido es el correcto. Con el seguimiento se podrá plantear si el número de sensores de campo instalados es redundante o son necesarios todos.
5. La línea de la industria 4.0, utilizando las últimas novedades para la gestión del mantenimiento se prevee fundamental para el éxito en un mundo globalizado.

7 GLOSARIO

A continuación, se van a exponer algunos términos genéricos y definiciones para las áreas técnicas, administrativas y de gestión del mantenimiento, según la norma española UNE-EN 13306 [3]“Mantenimiento, Terminología del mantenimiento” de Marzo 2011.

TÉRMINOS PRINCIPALES

- Mantenimiento: combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida.
- Gestión del mantenimiento: todas las actividades de la gestión que determinan los objetivos, las estrategias y las responsabilidades del mantenimiento y la implantación de dichas actividades por medios tales como la planificación del mantenimiento, el control del mismo y la mejora de las actividades de mantenimiento y económicas.
- Plan de mantenimiento: conjunto estructurado y documentado de tareas que incluyen las actividades, los procedimientos, los recursos y la duración necesaria para realizar el mantenimiento.
- Función requerida: función, combinación de funciones, o una combinación total de funciones de un elemento que se consideran necesarias para proporcionar un servicio dado.

OTRAS DEFINICIONES

- Elemento: parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede describirse y considerarse de forma individual.
- Activo (físico): elemento contabilizable formalmente.
- Elemento reparable: elemento que, después de un fallo y bajo condiciones dadas, se puede devolver a su estado en el que pueda realizar una función requerida.
- Elemento consumible: elemento o material que es fungible, que puede ser sustituido de forma regular y que generalmente no es un elemento específico.
- Repuesto: elemento destinado a sustituir a un elemento análogo, con objeto de conservar o mantener la función original requerida del elemento.

PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS

- Disponibilidad: aptitud de un elemento para encontrarse en un estado en que pueda realizar su función, cuándo y cómo se requiera, bajo condiciones dadas, asumiendo que se dispone de los recursos externos necesarios.

- Fiabilidad: aptitud de un elemento de realizar una función requerida bajo unas condiciones determinada durante un intervalo de tiempo dado.
- Mantenibilidad: capacidad de un elemento bajo condiciones de utilización dadas, de ser preservado, o ser devuelto a un estado en el que pueda realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo las condiciones dadas y utilizando procedimiento y recursos establecidos.
- Conformidad: cumplimiento de un requisito.
- Vida útil: intervalo de tiempo que comienza en un instante dado y termina en el instante en que se alcanza el estado límite.
- Tasa media de fallos: número de fallos de un elemento durante un intervalo de tiempo dado dividido por el intervalo de tiempo.
- Ciclo de vida: Serie de estados por los que pasa un elemento desde su concepto hasta su eliminación.
- Análisis centrado en fiabilidad de máquina etiquetadora de envasado en industria de manufacturas.

FALLOS Y EVENTOS

- Fallo: cese de la aptitud de un elemento para realizar la función requerida.
- Modo de fallo: manera en que se produce la inaptitud de un elemento para realizar una función requerida.
- Causa de fallo: circunstancias habidas durante la especificación, el diseño, la fabricación, la instalación, la utilización o el mantenimiento que provocan el fallo.
- Fallo primario: fallo de un elemento no causado directa ni indirectamente por el fallo o la avería de otro elemento.
- Fallo secundario: fallo de un elemento causado directa o indirectamente por el fallo o avería de otro elemento.
- Fallo repentino: fallo que no podría anticiparse mediante examen o monitorización previos.
- Fallo oculto: fallo que no se detecta durante el funcionamiento normal.
- Mecanismo de fallo: procesos físicos, químicos o de otros tipos que pueden conducir o han conducido al fallo.
- Severidad: consecuencias perjudiciales potenciales o reales de un fallo o de una avería.
- Criticidad: índice numérico de la severidad de un fallo o de una avería combinado con la probabilidad o frecuencia de su ocurrencia.

AVERÍAS Y ESTADOS

- Avería: estado de un elemento caracterizado por la inaptitud para realizar una función requerida, excluyendo la incapacidad durante el mantenimiento preventivo o por otras acciones planificadas, o debido a la falta de recursos externos.
- Avería latente: avería existente que aún no se ha hecho manifiesta.
- Avería parcial: avería caracterizada por el hecho de que un elemento puede realizar únicamente algunas, pero no todas las funciones requeridas.
- Estado de disponibilidad: estado de un elemento caracterizado por el hecho de que se puede realizar una función requerida, asumiéndose que se proporcionan los recursos externos como si fuesen necesarios.
- Estado degradado: estado de un elemento en el que la aptitud para realizar la función requerida está reducida, pero dentro de límites de aceptabilidad definidos.
- Estado de indisponibilidad: Estado de un elemento caracterizado por una avería o por una posible incapacidad para realizar una función requerida durante el mantenimiento preventivo.
- Estado de incapacidad; parada: estado de un elemento caracterizado por su inaptitud para realizar una función requerida, por cualquier causa.
- Estado de incapacidad externa: subconjunto del estado de incapacidad en la que el elemento se encuentra en un estado de disponibilidad, pero faltan los recursos externos requeridos o la incapacidad es debida a acciones planificadas distintas de las de mantenimiento.
- Estado operativo: estado en que un elemento está funcionando según lo requerido.
- Estado de reposo: estado de un elemento que está en estado de disponibilidad y sin funcionar durante el tiempo no requerido.
- Estado de espera: estado de un elemento que está en estado de disponibilidad y sin funcionar durante el tiempo requerido.
- Parada: cese del funcionamiento programado con antelación, para actividades de mantenimiento u otros fines.

TIPOS DE MANTENIMIENTO

- Mantenimiento preventivo: mantenimiento que se realiza a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios establecidos, y que está destinado a reducir la probabilidad de fallo o la degradación del funcionamiento de un elemento.
- Mantenimiento predeterminado: mantenimiento preventivo que se realiza de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número definido de unidades de funcionamiento, pero sin investigación previa de la condición.

- Mantenimiento basado en la condición: mantenimiento preventivo que incluye una combinación de monitorización de la condición y/o la inspección y/o los ensayos, análisis y las consiguientes acciones de mantenimiento.
- Mantenimiento predictivo: mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo la predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento.
- Mantenimiento correctivo: mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida.
- Mantenimiento programado: mantenimiento que se realiza de acuerdo con un programa de calendario establecido o un número establecido de unidades de utilización.
- Mantenimiento autónomo: acciones de mantenimiento que son realizadas por un operador de producción.

TÉRMINOS RELATIVOS AL TIEMPO

- Tiempo de disponibilidad: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de disponibilidad.
- Tiempo de indisponibilidad: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de indisponibilidad.
- Tiempo operativo: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de funcionamiento.
- Tiempo requerido: intervalo de tiempo durante el cual se requiere que un elemento se encuentre en estado de disponibilidad.
- Tiempo de espera: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de espera.
- Tiempo de reposo: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de reposo.
- Tiempo de mantenimiento: intervalo de tiempo durante el cual se realiza el mantenimiento de un elemento, incluidos los retrasos técnicos y logísticos
- Tiempo de mantenimiento preventivo: parte del tiempo de mantenimiento durante el cual se realiza mantenimiento preventivo sobre un elemento, incluidos los retrasos logísticos.
- Tiempo de mantenimiento correctivo: parte del tiempo de mantenimiento durante el cual se realiza mantenimiento correctivo activo sobre un elemento, incluidos los retrasos logísticos.
- Tiempo de reparación: parte del mantenimiento correctivo activo durante el cual se realiza la reparación de un elemento.

- Retraso logístico: tiempo acumulado durante el cual no se puede realizar el mantenimiento debido a la necesidad de adquirir recursos para el mantenimiento, excluido cualquier retraso administrativo.
- Retraso técnico: tiempo acumulado necesario para realizar acciones técnicas auxiliares asociadas con una acción de mantenimiento, pero sin formar parte de ella.
- Tiempo operativo hasta el fallo: tiempos de funcionamiento acumulado de un elemento desde el instante en que comienza a estar por primera vez en estado de operación hasta el primer fallo, o desde el instante de su recuperación hasta el siguiente fallo.
- Tiempo entre fallos: duración del tiempo transcurrido entre dos fallos consecutivos de un elemento.
- Tiempo operativo entre fallos: duración total del tiempo de funcionamiento entre dos fallos consecutivos de un elemento.

REFERENCIAS

- [1] UNESID, *www.unesid.org*.
- [2] «*www.technoindustria.wordpress.com*,» [En línea].
- [3] AENOR, "AENOR: Norma UNE-EN 13306:2011" *http://www.aenor.es*.
- [4] M. López Campos y A. Crespo Márquez, «Un modelo de referencia para la gestión del mantenimiento,» 2015.
- [5] A. Crespo Márquez, J. F. Gomez Fernández, C. A. Parra Márquez y M. López, «Ingeniería y gestión del mantenimiento una nueva visión del mantenimiento,» *Alción Ingeniería Química*, nº 59, 2002.
- [6] F. Vagliasindi, *Gestire la manutenzione : perché e come*, F. Angeli, 1989.
- [7] J. Campbell y A. Jardine, «Maintenance Excellence,» *Marcel Deker*.
- [8] C. Parra y A. Crespo, «On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models.,» *Guedes Soares \$ Zio*, 2006.
- [9] C. Parra y A. Crespo, *Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos*, Ingeman, 2012.
- [10] L. Saaty, *The Analytic Hierachy Process*, 1980.
- [11] T. Hurtado y B. Gérard, *El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*.
- [12] R. Jones, *Risk - Based Management: A Reliability - Centered Approach*, Houston: Gulf Publishing Company, 1995.
- [13] L. Barberá Martínez, A. Crespo Márquez, P. Viveros Gunckel y A. Arata Andreani, *The Graphical Analysis for Maintenance Management Method: A Quantitative Graphical Analysis to Support Maintenance Management Decision Making*, 2010.
- [14] M. Rausan y A. Hoyland, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications.*, 2004.
- [15] «Reliabilityweb,» [En línea]. Available: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/aplicacion-de-la-tecnica-optimizacion-costo-riesgo>. [Último acceso: 07 Noviembre 2018].
- [16] D. Nguyen y D. Muthy, *Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems*. Operations Research., 1981.

ANEXOS

ANEXO A. CÁLCULO DE CRITICIDAD.

INSTALACIÓN	MÁQUINA	EQUIPO	PROBABILIDAD DE FALLO			IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN					TIEMPO DE REPARACIÓN					SEGURIDAD Y MEDICAMENTO				COSTE DE REPARACIÓN					DETECTABILIDAD DEL FALLO				CONSECUENCIA	TOTAL		
			Bajo < 5 fallos/año	Medio: 5-10 fallos/año	Alto: > 10 fallos/año	Mejor caso de fallos/año	Empresario de 100 personas	Empresario de 500 personas	Empresario de 1000 personas	Empresario de 2000 personas	Empresario de 5000 personas	Empresario de 10000 personas	Menor de 1 hora	1 a 4 horas	4 a 8 horas	8 a 24 horas	> 24 horas	Bajo	Medio	Alto	Menor de 5.000 €	5.000 € a 10.000 €	10.000 € a 25.000 €	25.000 € a 50.000 €	50.000 € a 100.000 €	Alta probabilidad de detección	Probabilidad media de detección	Baja probabilidad de detección				Detección imposible
			1	2	3	1	10	16	20	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	25	50	75	100	1	30	65	100				
			Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor				Valor
PLANTA DE HUMOS	Filtro Alstom	Transportadores de cadena		2	2	1					1		2			2		50	50	1					1	1			1	14,53	28,05	No crítico
		Sistema de mangas		2	2						20	20		3			3		100	100			50			30			30	48,77	97,55	Semicrítico
		Válvulas de limpieza	1		1	1					1		2				2		100	100	1					1	1		1	27,58	27,58	No crítico
	Ventilador VP1	Compuertas módulos	1		1						20	20		3			3		50	50	1						30		30	28,18	28,18	No crítico
		Rodamientos	1		1		10				10			4			4		50	50			50			30		30	32,41	32,41	No crítico	
		Compuertas	1		1		10				10	2					2		50	50	1					30		30	24,13	24,13	No crítico	
	Ventilador VP2	Turbina	1		1		10				10			5	5		5		50	50					100	100	30		30	40,48	40,48	No crítico
		Rodamientos	1		1		10				10			4			4		50	50			50			30		30	32,41	32,41	No crítico	
		Compuertas	1		1		10				10	2					2		50	50	1					30		30	24,13	24,13	No crítico	
	Ventilador VP3	Turbina	1		1		10				10			5	5		5		50	50					100	100	30		30	40,48	40,48	No crítico
		Rodamientos	1		1		10				10			4			4		50	50			50			30		30	32,41	32,41	No crítico	
		Compuertas	1		1		10				10	2					2		50	50	1					30		30	24,13	24,13	No crítico	
	Ventilador Booster	Turbina	1		1		10				10			5	5		5		50	50					100	100	30		30	40,48	40,48	No crítico
		Rodamientos	1		1		10				20	20		4			4		50	50			50			30		30	36,09	36,09	No crítico	
		Compuertas	1		1		10				20	20	2				2		50	50	1					30		30	27,81	27,81	No crítico	
HORNO - 1	Cierre EBT	Central hidráulica	1		1		10			10		2			2		100	100	1						65		65	44,78	44,78	No crítico		
		Cadena cinemática	1		1		10			20	20		3			3		100	100	1					100	100	100	56,42	56,42	No crítico		
	Cilindros hidráulicos	Mangueras		3	3					20	20	1				1		50	50	1						100	100	100	42,63	127,90	Crítico	
		Guarniciones	1		1		10			20	20			5	5		5		50	50		25			65		65	40,21	40,21	No crítico		
	Carro vuelco	Estructura	1		1		10			20	20			5	5		5		50	50		25			30		30	32,61	32,61	No crítico		
		Ruedas	1		1		10			20	20			5	5	1			1		25				30		30	19,82	19,82	No crítico		
	Columnas	Reductores	1		1		10			20	20		4			4	1		1		25				30		30	19,45	19,45	No crítico		
		Rodillos	1		1		10			20	20	2				2	1		1	1	1				65		65	22,62	22,62	No crítico		
		Sistema de refrigeración	1		1		10			20	20			5	5	1			1	1	1				1	1		1	9,89	9,89	No crítico	
	Mordazas	Refrigeración		2	2					20	20	1				1		50	50	1					65		65	35,04	70,07	No crítico		
		Aislamiento	1		1		10			20	20			5	5		5		50	50		25			100	100	100	47,80	47,80	No crítico		
	Picardi	Central hidráulica	1		1		10			10	1					1	1		1	1						30		30	10,97	10,97	No crítico	
		Mordazas	1		1		10			10	1					1	1		1	1						30		30	10,97	10,97	No crítico	
	Carro empujador	Central hidráulica	1		1		10			20	20	2				2	1		1		25					30		30	18,72	18,72	No crítico	
		Brazo	1		1		10			20	20	2				2	1		1		60					65		65	30,16	30,16	No crítico	
Cucharas	Paneles	Sistema de refrigeración	1		1		10			20	20		4			4		100	100		50				30		30	49,14	49,14	No crítico		
	Cilindro hidráulico	1		1		10			20	20	2				2			100	100		50				65		65	56,00	56,00	No crítico		
	Central hidráulica	1		1		10			20	20		2			2			100	100		50				30		30	48,41	48,41	No crítico		
	Cadena cinemática	1		1		10			20	20	2				2			100	100		50				20		20	46,24	46,24	No crítico		
	Filtración	1		1		10			20	20			4	4		4		100	100		50				100	100	100	64,33	64,33	No crítico		
Evacuación	Camino de rodillos		2	2		15			15		2				2		50	50		25				65		65	37,26	74,52	No crítico			
	Enderezadoras		2	2		15			15			3			3		50	50		50				65		65	41,48	82,96	Semicrítico			
	Cizallas		2	2		15			15			3			3		50	50		25				65		65	37,63	75,26	Semicrítico			
	Elevador	1		1		10			20	20		3			3		50	50	1					65		65	35,77	35,77	No crítico			
	Volteador	1		1		10			20	20		3			3		50	50	1					65		65	35,77	35,77	No crítico			
	Placa	1		1		10			20	20			4	4		4		50	50	1					65		65	36,14	36,14	No crítico		
Calentadores cuchara	Central hidráulica	1		1	1				1	1					1	1		1	1						65		65	15,26	15,26	No crítico		
	Rampa gas	1		1	1				1	1					1	1		50	50	1					65		65	28,05	28,05	No crítico		
	Cadena cinemática	1		1	1				1	1		3			3	1		1	1						65		65	15,99	15,99	No crítico		
Carros artesas	Filtración buza	1		1		10			20	20			5	5		5		100	100		50				100	100	100	64,70	64,70	No crítico		
	Central hidráulica	1		1		10			20	20	2				2		50	50	1					65		65	35,41	35,41	No crítico			
	Cilindros	1		1		15			15	1					1		50	50	1					65		65	33,20	33,20	No crítico			
Terregraucuchas	Central hidráulica	1		1		10			20	20	2				2		50	50		25				30		30	31,51	31,51	No crítico			
	Cilindros	1		1		10			20	20		4			4		50	50		25				65		65	39,84	39,84	No crítico			

FACTORES DE CONSECUENCIA	
IP + TB	0,346
ISA	0,261
CS	0,194
DE	0,117

PROBABILIDAD DE FALLO (FF)	
Alto: > 10 fallos/año	3
Medio: 5-10 fallos/año	2
Bajo: < 5 fallos/año	1

IMPACTO EN SEGURIDAD O MEDIOAMBIENTE (SHA)	
Alto	100
Medio	50
Bajo	1

IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN (IP)	
Parada de Homo	20
Bajada de productividad	15
Disposición de by-pass	10
No paro de Homo-1	1

COSTE DE REPARACIÓN (CR)	
≥ 100,000 €	100
≥ 50,000 a 100,000 €	75
≥ 10,000 a 50,000 €	50
≥ 5,000 a 10,000 €	25
< 5,000 €	1

TIEMPO DE REPARACIÓN (TR)	
> 12 h	5
> 8 A 12 h	4
> 4 A 8 h	3
> 1 A 4 h	2
< 1 h	1

DETECTABILIDAD DEL FALLO (DF)	
Detección imposible	100
Baja posibilidad de detección	65
Possibilidad media de detección	30
Alta posibilidad de detección	1

PONDERACIÓN FACTORES		
	Máximo Valor	Ponderado
IP x TR	100	36,8
SHA	100	26,1
CR	100	15,4
DF	100	21,7
SUMA	400	100

LÍMITES CRITICIDAD	
No crítico	0
Semicrítico	75
Crítico	125

CRITICIDAD OBTENIDA		
No crítico	45	90,00%
Semicrítico	3	6,00%
Crítico	2	4,00%
TOTAL	50	1

Frecuencia	3	No crítico 0	No crítico 0	Semicrítico 0	Semicrítico 0	Crítico 1	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0
	2	No crítico 0	No crítico 1	No crítico 0	Semicrítico 3	Semicrítico 2	Semicrítico 0	Crítico 1	Crítico 0	Crítico 0	Crítico 0
	1	No crítico 1	No crítico 7	No crítico 8	No crítico 13	No crítico 9	No crítico 2	No crítico 2	Semicrítico 0	Semicrítico 0	Semicrítico 0
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Consecuencia

Frecuencia	3	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
	2	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Consecuencia

$$Riesgo = FF \times [(0,368 \times IP \times TR) + 0,261 \times S\&A + 0,154 \times CR + 0,217 \times DF]$$

ANEXO B. CÁLCULO RCM.

VENTILADOR BOOSTER														
ÁREA: ACERIA										CÓDIGO: PH0035				
COMPONENTE AFECTADO	MODO DE FALLO	EFECTO	CAUSAS	CONTROLES	PROBABILIDAD			TAREAS NO OCURRA	FRECUENCIA TAREA	DURACIÓN TAREA (min)	TIEMPO PARADA MAQ/PROD (min)	ESPECIALIZACIÓN NECESARIA	GxPd MTO PROPUESTO	
Rotor	Desgaste	Descenso aspiración	Propias del proceso	No existen	G	10	Crítico: Riesgo medioambiental o de seguridad	Instalar sensores de presión y crear curva de trabajo	En continuo	0	0	ELECTRICO	280	
					PO	3,5	Poca: 6 meses <>1 año						Preventivo, predictivo o mejora técnica	
					PND	8	Elevada							
	Vibraciones	Descenso aspiración	Desgaste de la turbina por motivos propios del proceso	Preventivo mensual	G	6	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.	Instalar sensores de vibración y crear curva de trabajo	En continuo	0	0	ELECTRICO	168	
					PO	3,5	Poca: 6 meses <>1 año						Preventivo, predictivo o mejora técnica	
					PND	8	Elevada							
Rodamientos	Vibraciones	Descenso aspiración	Entrada de suciedad	No existen	G	6	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.	Instalar sensores de vibración crear curva de trabajo	En continuo	0	0	ELECTRICO	168	
					PO	3,5	Poca: 6 meses <>1 año						Preventivo, predictivo o mejora técnica	
					PND	8	Elevada							
		Descenso aspiración	Falta lubricante	Preventivo mensual	G	6	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.	Instalar sensores de vibración crear curva de trabajo	En continuo	0	0	ELECTRICO	168	
					PO	3,5	Poca: 6 meses <>1 año						Preventivo, predictivo o mejora técnica	
					PND	8	Elevada							
	Temperatura	Descenso aspiración	Falta lubricante	Preventivo mensual	G	6	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.	Instalar sensores de temperatura y crear curva de trabajo	En continuo	0	0	ELECTRICO	168	
					PO	3,5	Poca: 6 meses <>1 año						Preventivo, predictivo o mejora técnica	
					PND	8	Elevada							
	Bancada	Vibraciones	Descenso aspiración	Tornillería floja	Preventivo mensual	G	6	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.	Eliminar preventivo					48
						PO	1	Muy raro: > 2 años						Correctivo
						PND	8	Elevada						
Carcasa	Salida polvo al recinto	Descenso aspiración	Propias del proceso	No existen	G	6	Moderada: Paro de maquina sin paro de acería.	Eliminar preventivo					48	
					PO	1	Muy raro: > 2 años						Correctivo	
					PND	8	Elevada							

Compuerta aspiración	No abre o cierra	Paro de ventilador	Cilindro hidráulico en mal estado	Preventivo anual	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.	Eliminar preventivo						48			
					PO	1	Muy raro: > 2 años							Correctivo			
					PND	8	Elevada										
		Paro de ventilador	Rotura latiguillo	No existen	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.									48	
					PO	1	Muy raro: > 2 años									Correctivo	
					PND	8	Elevada										
	Paro de ventilador	Rotura cadena cinemática	No existen	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.										48	
				PO	1	Muy raro: > 2 años										Correctivo	
				PND	8	Elevada											
	Rotura álabes	Paro de ventilador	Fatiga	No existen	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.									48	
					PO	1	Muy raro: > 2 años									Correctivo	
					PND	8	Elevada										
Compuerta impulsión	No abre o cierra	Paro de ventilador	Cilindro hidráulico en mal estado	Preventivo anual	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.	Eliminar preventivo							48		
					PO	1	Muy raro: > 2 años								Correctivo		
					PND	8	Elevada										
		Paro de ventilador	Rotura latiguillo	No existen	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.										48
					PO	1	Muy raro: > 2 años										Correctivo
					PND	8	Elevada										
	Paro de ventilador	Rotura cadena cinemática	No existen	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.										48	
				PO	1	Muy raro: > 2 años										Correctivo	
				PND	8	Elevada											
	Rotura álabes	Paro de ventilador	Fatiga	No existen	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.									48	
					PO	1	Muy raro: > 2 años									Correctivo	
					PND	8	Elevada										
Junta de dilatación	Salida polvo al recinto	Descenso aspiración	Rotura tela	Preventivo anual	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.	Preventivo anual	Anual	600	0	MECÁNICA			96		
					PO	2	Raro 1: <= 2 años								Preventivo, predictivo o mejora técnica		
					PND	8	Elevada										
Acoplamiento	No transmitir movimiento	Descenso aspiración	Rotura componente elástico	Preventivo anual	G	6	Moderada: paro de máquina sin paro de acería.	Eliminar preventivo							48		
					PO	1	Muy raro: > 2 años								Correctivo		
					PND	8	Elevada										

ANEXO C. CÁLCULO GAMM.

Correctivo	i	N(ti)	Ti Dígito	Delta T	Equipo parado	TBF Dígito	Z(ti)	1/(n-i+1)	R(ti)	Fecha intervención
	1	14	2115	1	1	24,0	0	0,032	1,000	28/11/2017
	2	18	2731	2	0	87,5	0	0,033	1,000	15/01/2018
si	3	22	3101	3	0	88,0	0,034	0,034	0,966	14/02/2018
	4	16	2467	1	1	88,0	0,034	0,036	0,966	26/12/2017
	5	19	2819	1	1	88,0	0,034	0,037	0,966	23/01/2018
	6	20	2907	0,5	1	88,0	0,034	0,038	0,966	29/01/2018
	7	23	3171	0,5	1	88,0	0,034	0,040	0,966	19/02/2018
	8	12	1968	2	0	120,0	0,034	0,042	0,966	20/11/2017
	9	6	984	2	0	122,0	0,034	0,043	0,966	25/09/2017
	10	8	1476	2	0	122,5	0,034	0,045	0,966	23/10/2017
si	11	11	1845	3	0	122,5	0,082	0,048	0,921	15/11/2017
	12	28	4454	2	0	122,5	0,082	0,050	0,921	30/04/2018
	13	1	123	2	0	123,0	0,082	0,053	0,921	07/08/2017
	14	2	246	0,5	1	123,0	0,082	0,056	0,921	14/08/2017
	15	3	369	1	1	123,0	0,082	0,059	0,921	22/08/2017
	16	9	1599	1	1	123,0	0,082	0,063	0,921	31/10/2017
	17	10	1722	0,5	1	123,0	0,082	0,067	0,921	06/11/2017
	18	13	2091	0,5	1	123,0	0,082	0,071	0,921	27/11/2017
	19	25	3593	0,5	1	123,0	0,082	0,077	0,921	12/03/2018
	20	29	4577	1	1	123,0	0,082	0,083	0,921	08/05/2018
	21	30	4700	0,5	1	123,0	0,082	0,091	0,921	14/05/2018
	22	21	3083	2	0	175,5	0,082	0,100	0,921	12/02/2018
	23	17	2643	0,5	1	176,0	0,082	0,111	0,921	08/01/2018
si	24	31	4911	16	0	210,5	0,207	0,125	0,813	24/05/2018
	25	4	615	2	0	245,0	0,207	0,143	0,813	04/09/2017
	26	5	861	1	1	246,0	0,207	0,167	0,813	19/09/2017
	27	15	2379	2	0	263,0	0,207	0,200	0,813	18/12/2017
	28	24	3470	1	1	299,0	0,207	0,250	0,813	05/03/2018
	29	26	3962	2	0	368,5	0,207	0,333	0,813	02/04/2018
	30	7	1353	0,5	1	369,0	0,207	0,500	0,813	16/10/2017
	31	27	4331	0,5	1	369,0	0,207	1,000	0,813	23/04/2018

Correctivo	i	N(ti)	Ti dígito	Delta T	Equipo parado	TBF dígito	Z(ti) Dígito	1/(n-i+1)Dígito	R(ti) dígito	Fecha intervención	Vibraciones	Tamaño
	13	1	123	2	0	123	0,0821	0,053	0,921	07/08/2017	2,4	0,1
	14	2	246	0,5	1	123	0,0821	0,056	0,921	14/08/2017	2,6	0,2
	15	3	369	1	1	123	0,0821	0,059	0,921	22/08/2017	2,8	0,3
	25	4	615	2	0	245	0,2071	0,143	0,813	04/09/2017	3	0,4
	26	5	861	1	1	246	0,2071	0,167	0,813	19/09/2017	3,2	0,5
	9	6	984	2	0	122	0,0345	0,043	0,966	25/09/2017	3,4	0,6
	30	7	1353	0,5	1	369	0,2071	0,500	0,813	16/10/2017	3,6	0,7
	10	8	1476	2	0	122,5	0,0345	0,045	0,966	23/10/2017	3,8	0,8
	16	9	1599	1	1	123	0,0821	0,063	0,921	31/10/2017	4	0,9
	17	10	1722	0,5	1	123	0,0821	0,067	0,921	06/11/2017	4,2	1
si	11	11	1845	3	0	122,5	0,0821	0,048	0,921	15/11/2017	4,4	1,1
	8	12	1968	2	0	120	0,0345	0,042	0,966	20/11/2017	2,4	0,1
	18	13	2091	0,5	1	123	0,0821	0,071	0,921	27/11/2017	2,6	0,2
	1	14	2115	1	1	24	0,0000	0,032	1,000	28/11/2017	2,8	0,3
	27	15	2379	2	0	263	0,2071	0,200	0,813	18/12/2017	3	0,4
	4	16	2467	1	1	88	0,0345	0,036	0,966	26/12/2017	3,2	0,5
	23	17	2643	0,5	1	176	0,0821	0,111	0,921	08/01/2018	3,4	0,6
	2	18	2731	2	0	87,5	0,0000	0,033	1,000	15/01/2018	3,6	0,7
	5	19	2819	1	1	88	0,0345	0,037	0,966	23/01/2018	3,8	0,8
	6	20	2907	0,5	1	88	0,0345	0,038	0,966	29/01/2018	4	0,9
	22	21	3083	2	0	175,5	0,0821	0,100	0,921	12/02/2018	4,2	1
si	3	22	3101	3	0	88	0,0345	0,034	0,966	14/02/2018	4,4	1,1
	7	23	3171	0,5	1	88	0,0345	0,040	0,966	19/02/2018	3	0,4
	28	24	3470	1	1	299	0,2071	0,250	0,813	05/03/2018	3,4	0,6
	19	25	3593	0,5	1	123	0,0821	0,077	0,921	12/03/2018	3,8	0,8
	29	26	3962	2	0	368,5	0,2071	0,333	0,813	02/04/2018	3,8	0,8
	31	27	4331	0,5	1	369	0,2071	1,000	0,813	23/04/2018	4,2	1
	12	28	4454	2	0	122,5	0,0821	0,050	0,921	30/04/2018	4,2	1
	20	29	4577	1	1	123	0,0821	0,083	0,921	08/05/2018	4,4	1,1
	21	30	4700	0,5	1	123	0,0821	0,091	0,921	14/05/2018	4,4	1,1
si	24	31	4911	16	0	210,5	0,2071	0,125	0,813	24/05/2018	5	1,6

ANEXO D. CÁLCULO RIESGO BENEFICIO

Modelo de sustituciones periódicas con reparaciones mínimas mto actual								CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA CURVA DE COSTES: -Las tasas de fallo en cada periodo entre revisión son iguales al igual que la duración de los intervalos.		
$CTE(k, T_1, \dots, T_k) = \frac{(k-1) \times C_{pp} + C_s + C_{rm} \times \sum_{i=1}^k N(T_i)}{\sum_{i=1}^k T_i}$								Numero de revisiones K		
								2		
Ti	t	f(t)	F(t)	R(t)	λ(t)	N(t)	CTE(2,Ti)	Riesgo (t)	Impacto Total (t)	
1	0	0,000	0,000	1,000	0,015	0,015	72.385,99 €	- €	72.385,99 €	
2	1	0,015	0,015	0,985	0,015	0,029	36.335,99 €	9.838,95 €	46.174,94 €	
3	2	0,014	0,029	0,971	0,015	0,044	24.319,32 €	19.534,71 €	43.854,03 €	
4	3	0,014	0,043	0,957	0,015	0,058	18.310,99 €	29.089,35 €	47.400,34 €	
5	4	0,014	0,057	0,943	0,015	0,073	14.705,99 €	38.504,94 €	53.210,92 €	
6	5	0,014	0,071	0,929	0,015	0,087	12.302,65 €	47.783,49 €	60.086,14 €	
7	6	0,014	0,084	0,916	0,015	0,102	10.585,99 €	56.927,00 €	67.512,98 €	
8	7	0,013	0,098	0,902	0,015	0,116	9.298,49 €	65.937,43 €	75.235,92 €	
9	8	0,013	0,111	0,889	0,015	0,131	8.297,10 €	74.816,73 €	83.113,83 €	
10	9	0,013	0,124	0,876	0,015	0,146	7.495,99 €	83.566,80 €	91.062,78 €	
11	10	0,013	0,136	0,864	0,015	0,160	6.840,53 €	92.189,52 €	99.030,05 €	
12	11	0,013	0,149	0,851	0,015	0,175	6.294,32 €	100.686,74 €	106.981,06 €	
13	12	0,012	0,161	0,839	0,015	0,189	5.832,14 €	109.060,30 €	114.892,44 €	
14	13	0,012	0,174	0,826	0,015	0,204	5.435,99 €	117.311,98 €	122.747,97 €	
15	14	0,012	0,186	0,814	0,015	0,218	5.092,65 €	125.443,57 €	130.536,23 €	
16	15	0,012	0,197	0,803	0,015	0,233	4.792,24 €	133.456,82 €	138.249,05 €	
17	16	0,012	0,209	0,791	0,015	0,247	4.527,16 €	141.353,44 €	145.880,60 €	
18	17	0,012	0,221	0,779	0,015	0,262	4.291,54 €	149.135,13 €	153.426,67 €	
19	18	0,011	0,232	0,768	0,015	0,277	4.080,72 €	156.803,56 €	160.884,29 €	
20	19	0,011	0,243	0,757	0,015	0,291	3.890,99 €	164.360,39 €	168.251,38 €	
21	20	0,011	0,254	0,746	0,015	0,306	3.719,32 €	171.807,24 €	175.526,56 €	
22	21	0,011	0,265	0,735	0,015	0,320	3.563,26 €	179.145,71 €	182.708,97 €	
23	22	0,011	0,276	0,724	0,015	0,335	3.420,77 €	186.377,37 €	189.798,14 €	
24	23	0,011	0,286	0,714	0,015	0,349	3.290,15 €	193.503,78 €	196.793,94 €	
25	24	0,010	0,297	0,703	0,015	0,364	3.169,99 €	200.526,48 €	203.696,46 €	
26	25	0,010	0,307	0,693	0,015	0,378	3.059,06 €	207.446,96 €	210.506,03 €	
27	26	0,010	0,317	0,683	0,015	0,393	2.956,36 €	214.266,73 €	217.223,09 €	
28	27	0,010	0,327	0,673	0,015	0,408	2.860,99 €	220.987,24 €	223.848,23 €	
29	28	0,010	0,337	0,663	0,015	0,422	2.772,19 €	227.609,94 €	230.382,13 €	
30	29	0,010	0,346	0,654	0,015	0,437	2.689,32 €	234.136,25 €	236.825,57 €	
31	30	0,010	0,356	0,644	0,015	0,451	2.611,79 €	240.567,58 €	243.179,37 €	
32	31	0,009	0,365	0,635	0,015	0,466	2.539,11 €	246.905,31 €	249.444,42 €	
33	32	0,009	0,374	0,626	0,015	0,480	2.470,83 €	253.150,80 €	255.621,63 €	
34	33	0,009	0,384	0,616	0,015	0,495	2.406,57 €	259.305,39 €	261.711,96 €	
35	34	0,009	0,393	0,607	0,015	0,509	2.345,99 €	265.370,40 €	267.716,39 €	
36	35	0,009	0,401	0,599	0,015	0,524	2.288,76 €	271.347,15 €	273.635,91 €	
37	36	0,009	0,410	0,590	0,015	0,538	2.234,64 €	277.236,91 €	279.471,55 €	
38	37	0,009	0,419	0,581	0,015	0,553	2.183,35 €	283.040,95 €	285.224,31 €	
39	38	0,008	0,427	0,573	0,015	0,568	2.134,70 €	288.760,52 €	290.895,23 €	

Modelo de sustituciones periódicas con reparaciones mínimas RCM										CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA CURVA DE COSTES: -Las tasas de fallo en cada periodo entre revisión son iguales al igual que la duración de los intervalos.	
										Numero de revisiones K 2	
Ti	t	f(t)	F(t)	R(t)	λ(t)	N(t)	CTE(2,Ti)	Riesgo (t)	Impacto Total (t)		
1	0	0,000	0,000	1,000	0,005	0,005	54.362,09 €	- €	54.362,09 €		
2	1	0,005	0,005	0,995	0,005	0,010	27.228,09 €	2.759,52 €	29.987,61 €		
3	2	0,005	0,010	0,990	0,005	0,014	18.183,43 €	5.505,82 €	23.689,25 €		
4	3	0,005	0,014	0,986	0,005	0,019	13.661,09 €	8.238,97 €	21.900,06 €		
5	4	0,005	0,019	0,981	0,005	0,024	10.947,69 €	10.959,03 €	21.906,73 €		
6	5	0,005	0,024	0,976	0,005	0,029	9.138,76 €	13.666,07 €	22.804,83 €		
7	6	0,005	0,028	0,972	0,005	0,034	7.846,67 €	16.360,15 €	24.206,81 €		
8	7	0,005	0,033	0,967	0,005	0,038	6.877,59 €	19.041,32 €	25.918,92 €		
9	8	0,005	0,038	0,962	0,005	0,043	6.123,87 €	21.709,66 €	27.833,53 €		
10	9	0,005	0,042	0,958	0,005	0,048	5.520,89 €	24.365,22 €	29.886,11 €		
11	10	0,005	0,047	0,953	0,005	0,053	5.027,55 €	27.008,06 €	32.035,61 €		
12	11	0,005	0,051	0,949	0,005	0,057	4.616,43 €	29.638,25 €	34.254,68 €		
13	12	0,005	0,056	0,944	0,005	0,062	4.268,56 €	32.255,84 €	36.524,40 €		
14	13	0,005	0,060	0,940	0,005	0,067	3.970,38 €	34.860,90 €	38.831,28 €		
15	14	0,004	0,065	0,935	0,005	0,072	3.711,96 €	37.453,49 €	41.165,45 €		
16	15	0,004	0,069	0,931	0,005	0,077	3.485,84 €	40.033,66 €	43.519,50 €		
17	16	0,004	0,074	0,926	0,005	0,081	3.286,33 €	42.601,47 €	45.887,80 €		
18	17	0,004	0,078	0,922	0,005	0,086	3.108,98 €	45.156,99 €	48.265,97 €		
19	18	0,004	0,083	0,917	0,005	0,091	2.950,30 €	47.700,27 €	50.650,58 €		
20	19	0,004	0,087	0,913	0,005	0,096	2.807,49 €	50.231,37 €	53.038,87 €		
21	20	0,004	0,092	0,908	0,005	0,101	2.678,28 €	52.750,36 €	55.428,64 €		
22	21	0,004	0,096	0,904	0,005	0,105	2.560,82 €	55.257,28 €	57.818,10 €		
23	22	0,004	0,100	0,900	0,005	0,110	2.453,57 €	57.752,19 €	60.205,77 €		
24	23	0,004	0,105	0,895	0,005	0,115	2.355,26 €	60.235,16 €	62.590,42 €		
25	24	0,004	0,109	0,891	0,005	0,120	2.264,81 €	62.706,24 €	64.971,06 €		
26	25	0,004	0,113	0,887	0,005	0,125	2.181,32 €	65.165,49 €	67.346,82 €		
27	26	0,004	0,117	0,883	0,005	0,129	2.104,02 €	67.612,96 €	69.716,98 €		
28	27	0,004	0,122	0,878	0,005	0,134	2.032,24 €	70.048,71 €	72.080,95 €		
29	28	0,004	0,126	0,874	0,005	0,139	1.965,40 €	72.472,80 €	74.438,21 €		
30	29	0,004	0,130	0,870	0,005	0,144	1.903,03 €	74.885,28 €	76.788,31 €		
31	30	0,004	0,134	0,866	0,005	0,148	1.844,67 €	77.286,21 €	79.130,88 €		
32	31	0,004	0,138	0,862	0,005	0,153	1.789,97 €	79.675,64 €	81.465,61 €		
33	32	0,004	0,142	0,858	0,005	0,158	1.738,58 €	82.053,63 €	83.792,21 €		
34	33	0,004	0,146	0,854	0,005	0,163	1.690,21 €	84.420,23 €	86.110,44 €		
35	34	0,004	0,151	0,849	0,005	0,168	1.644,61 €	86.775,50 €	88.420,11 €		
36	35	0,004	0,155	0,845	0,005	0,172	1.601,54 €	89.119,49 €	90.721,03 €		
37	36	0,004	0,159	0,841	0,005	0,177	1.560,80 €	91.452,26 €	93.013,06 €		
38	37	0,004	0,163	0,837	0,005	0,182	1.522,20 €	93.773,86 €	95.296,06 €		
39	38	0,004	0,167	0,833	0,005	0,187	1.485,58 €	96.084,34 €	97.569,92 €		