

Samir Boulanouar Al Massati

**Plan de fiabilidad de equipos en ventiladores
centrífugos**

**Trabajo Fin de Máster
Dirigido por la Dra. Silvia De La Flor López**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
2022**

Samir Boulanouar Al Massati

**Plan de fiabilidad de equipos en ventiladores
centrífugos**

**Trabajo Fin de Máster
Dirigido por la Dra. Silvia De La Flor López**

Máster en Ingeniería Industrial

ÍNDICE GENERAL



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
2022**

Índice

1. Introducción.....	1
2. Objeto y alcance.....	1
3. Antecedentes	2
4. Definiciones y abreviaturas.....	3
4.1. Definiciones.....	3
4.2. Abreviaturas.....	4
5. Mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM).....	5
5.1. Evolución del mantenimiento hasta el RCM.....	5
5.2. Nuevas técnicas de mantenimiento.....	6
5.3. Introducción al mantenimiento centrado en la fiabilidad	7
5.4. Beneficios del mantenimiento centrado en la fiabilidad	9
6. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE).....	10
6.1. Guía para la realización del AMFE	10
6.1.1. Planificación del AMFE	12
6.1.2. Análisis AMFE/AMFEC.....	13
7. Análisis de Pareto	19
8. Análisis de Weibull.....	20
8.1. Estimación de parámetros de Weibull	22
9. Frecuencia óptima de intervención	24
10. Desarrollo del mantenimiento basado en fiabilidad de los ventiladores VTR08A y VTC02A.....	26
10.1. Reconocimiento del equipo y del entorno que lo rodea.....	27
10.1.1. Ventilador VTR08A	27
10.1.2. Ventilador VTC02A	28
10.2. Análisis AMFEC de los ventiladores centrífugos.	29
10.2.1. Definición de los objetivos y alcance del análisis	29
10.2.2. Identificación de los límites y el escenario	29
10.2.3. Definición de criterios de decisión para el tratamiento de los modos de fallo.....	29
10.2.4. División de los equipos	29
10.2.5. Identificación de las funciones de cada componente.....	30
10.2.6. Identificación de los modos de fallo.	31
10.2.7. Identificación de los métodos de detección y los controles existentes	42

10.3.	Tabla final AMFEC ventilador VTC02A, reductor VTR08A, acoplamiento VTR08A y ventilador VTR08A.....	57
10.4.	Análisis de Pareto del ventilador VTR08A	62
10.5.	Análisis de Pareto del ventilador VTC02A	64
10.6.	Análisis de Weibull para el ventilador VTR08A	66
10.7.	Análisis de Weibull para el ventilador VTC02A	70
10.8.	Frecuencia óptima de mantenimiento para el ventilador VTR08A.....	74
10.9.	Frecuencia óptima de mantenimiento para el ventilador VTC02A.....	75
11.	Plan de mantenimiento final	75
11.1.	Plan de mantenimiento propuesto para el ventilador VTR08A	76
11.2.	Plan de mantenimiento propuesto para el ventilador VTC02A	80
12.	Análisis económico	83
12.1.	Análisis de inversión sobre la monitorización	83
12.2.	Coste-beneficio del mantenimiento propuesto	85
13.	Conclusiones del proyecto.....	90
14.	Normas y referencias.....	91

1. INTRODUCCIÓN

Toda industria busca con el mantenimiento conservar sus equipos e instalaciones durante el mayor tiempo posible, la más alta disponibilidad, el máximo rendimiento y la seguridad del entorno. Para ello, existen diferentes técnicas de mantenimiento, las más utilizadas actualmente en la industria son las conocidas como mantenimiento preventivo, predictivo, proactivo y correctivo.

El aumento constante del número y variedad de plantas y equipos alrededor del mundo ha implicado que las técnicas de mantenimiento industrial evolucionen significativamente a lo largo de las últimas décadas.

El mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM), el que se tratará en este proyecto, es una técnica que busca combinar de manera eficiente el correctivo, el preventivo, el predictivo y el proactivo.

Desde IDOM, empresa independiente que presta servicios profesionales de consultoría, ingeniería y arquitectura, se busca sustituir el mantenimiento preventivo puro sistemático que tiene actualmente la Central Nuclear XX¹ por un mantenimiento centrado en la fiabilidad, que combina las cuatro técnicas comentadas anteriormente y tendiendo a proponer, siempre que sea posible, un mantenimiento basado en la condición, en el cual se decide si vale la pena intervenir o no y cuando es mejor hacerlo.

El departamento de fiabilidad de equipos, departamento interno de IDOM, es el encargado de realizar el estudio de esta sustitución. Para ello se hará uso del análisis modal de fallos y efectos (AMFE) y su variante el análisis modal de fallos, efectos y criticidad (AMFEC). Estos permitirán encontrar la causa raíz que provoca la aparición de estos modos de fallo y poder así, actuar directamente sobre ella cuando sea necesario. También se hará uso de distribuciones probabilísticas para conocer el estado de vida de los equipos y proponer un mantenimiento que se adecue a este estado.

2. OBJETO Y ALCANCE

El objeto de este proyecto es el de realizar un plan de mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) de dos ventiladores centrífugos, definiendo las tareas, principalmente basadas en condición, que debe realizar el personal de mantenimiento de la planta para garantizar la fiabilidad del equipo. Se propondrá la monitorización de los modos de fallo y mecanismos de degradación detectados siempre y cuando sea posible.

La finalidad del estudio es la de aumentar la fiabilidad de los equipos en cuestión, reducir los tiempos de indisponibilidad, mejoras en seguridad y la optimización de recursos, reduciendo tareas de bajo valor. Finalmente se realizará un estudio de la viabilidad y la rentabilidad de la inversión en la monitorización propuesta y el análisis de coste-beneficios de la implantación del plan de fiabilidad de equipos presentado frente al que dispone actualmente la Central Nuclear XX.

En cuanto al alcance, se ha decidido estudiar dos ventiladores centrífugos de la central. El primero se trata de uno de los ventiladores del sistema de refrigeración del edificio de contención, lugar donde se encuentra el reactor nuclear, el generador de vapor y todos los equipos asociados que contengan material radioactivo. El ventilador pertenece al subsistema de refrigeración de la cavidad del reactor, cuya función es la de recircular el aire a través de la vasija del reactor y soportes de la vasija, eliminando la carga térmica desprendida.

¹ Por motivos de confidencialidad, se sustituye el nombre de la Central Nuclear por las letras XX.

El segundo ventilador a estudiar pertenece al sistema de generadores diésel de emergencia. Este es uno de los sistemas más importantes en la central puesto que en caso de pérdida de suministro de corriente alterna desde el exterior (PSE), ya sea por indisponibilidad de las líneas o cualquier otra causa, dispone de dos grupos de generadores que funcionan mediante diésel y que permitirían alimentar las barras de salvaguardas.

El ventilador del sistema de refrigeración del edificio de contención y el ventilador del sistema de generadores diésel, VTR08A² y VTC02A³ respectivamente, se diferencian principalmente en el acoplamiento al motor de baja tensión asociado. El VTR08A tiene un acoplamiento flexible basado en dos cubos de acoplamiento y un elastómero que junta el eje del ventilador junto al eje de la caja reductora de velocidad. El VTC02A se acopla al motor mediante un sistema poleas/correas el cual hace también la función de reductor de velocidad. En los siguientes apartados, se hará una descripción más detallada de estos ventiladores.

Se ha decidido estudiar también el reductor de velocidad y el acoplamiento del eje del ventilador al eje del reductor de velocidad para el VTR08A y el sistema poleas/correas para el VTC02A, puesto que un fallo en estos repercute directamente en un fallo en el ventilador.

La motivación en la elección de estos equipos se ha basado en su criticidad puesto que al ser la más elevada dentro de todos los ventiladores de la central, se deberá realizar un mantenimiento más exhaustivo. Los equipos con criticidad alta son aquellos cuyo fallo podría suponer una pérdida de una función importante o afectar a la seguridad de la planta o el entorno.

3. ANTECEDENTES

La Central Nuclear XX del tipo PWR (reactor de agua presurizada) es una empresa dedicada a la producción de energía eléctrica con una potencia instalada superior a 1000 MW. La central tiene actualmente como mantenimiento principal para sus equipos, el conocido como mantenimiento preventivo sistemático, donde se interviene en ellos por periodos de tiempo naturales o por algún tipo de contador, es decir, cada X recargas o cada X meses o años. Una recarga es el proceso mediante el cual se sustituye el combustible irradiado del reactor por nuevo combustible y se realiza cada 18 meses (1 recarga (1 RE) = 18 meses). Durante este proceso, la central se encuentra parada y puede llegar a estarlo durante uno o dos meses, por lo que el personal de mantenimiento aprovecha para realizar gran parte de las tareas requeridas. Actualmente, la elección de la frecuencia de actuación del mantenimiento se basa en experiencia operativa, normativas y manuales del fabricante.

Más adelante se entrará en detalle del mantenimiento que se realiza en los ventiladores VTC02A y VTR08A, pero en términos generales, para el VTC02A se basa en una revisión parcial (equipo parado, pero sin abrirlo) y pruebas de operabilidad cada 18 meses, revisiones eléctricas que cubren el correcto estado de la puesta a tierra y posibles fugas de corriente cada recarga y rondas de operador cada turno. Para el VTR08A se basa en una revisión general (equipo parado y abriéndolo), comprobaciones de operabilidad, revisiones eléctricas que cubren el correcto estado de la puesta a tierra, posibles fugas de corriente y revisión del motor y un análisis de aceite del reductor cada recarga.

² Código ficticio del equipo por temas de confidencialidad, pero pertenece a un ventilador centrífugo real de la Central Nuclear XX.

³ Código ficticio del equipo por temas de confidencialidad, pero pertenece a un ventilador centrífugo real de la Central Nuclear XX

Con la estrategia de mantenimiento que disponen actualmente se busca anticiparse al fallo sustituyendo o analizando determinados elementos antes de que su degradación sea máxima. Para ello no tienen en cuenta la optimización de recursos, es decir, actuar solamente cuando y donde sea necesario, si no que actúan en periodos naturales independientemente de cómo se encuentre el sistema, equipo o componente.

4. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

4.1. Definiciones

Causa del fallo: Circunstancia o conjunto de circunstancias que conducen a un fallo o a un suceso [1].

Causa Raíz: Factor causal sin predecesor que es relevante para el propósito del análisis. [1]

Componente de nivel inferior: Todos los componentes que forman parte del equipo y cuyas funciones intervienen para su correcto rendimiento.

Detección del fallo: Medios por los que se hace evidente un modo de fallo [2].

Efecto final: Impacto que tiene el fallo en el equipo.

Efecto local: Impacto que tiene el fallo en el propio componente o en los adyacentes.

Efecto: Impacto que tiene un fallo a la operabilidad, seguridad o disponibilidad del equipo.

Escenario: La posible secuencia de condiciones especificadas bajo las cuales las funciones del sistema, elemento o proceso se realizan [3]

Fiabilidad de equipos: Es la probabilidad de que un elemento (componente, equipo o sistema) funcionará sin fallos durante un periodo de tiempo determinado en unas condiciones especificadas [4]

Función principal: Función para la que ha sido diseñado el equipo.

Función secundaria: Función de los componentes internos del equipo.

Mantenimiento basado en la condición: Se conoce también como mantenimiento predictivo, y es aquel que se realiza en base a pruebas e inspecciones predictivas. Se recogen y analizan datos en tiempo real para determinar cuándo un equipo necesita mantenimiento [5].

Mantenimiento correctivo: Conocido también como *Run To Failure*, es el mantenimiento que se basa en una decisión consciente después de analizar qué función o funciones de la instalación se verían afectadas por el fallo frente al coste de la prevención del fallo [5].

Mantenimiento preventivo sistemático: Enfoque más básico. Se programa las tareas en función del tiempo transcurrido desde la última vez que se realizó la tarea. Es el tipo de mantenimiento que se realiza con más frecuencia en los programas de mantenimiento preventivo [5].

Mantenimiento preventivo: Consiste en inspecciones y mantenimientos periódicos a intervalos predefinidos (tiempo, horas de funcionamiento o ciclos) en un intento de reducir los fallos del equipo. Se realiza independientemente del estado del equipo [5].

Mantenimiento proactivo: Es aquel mantenimiento que tiene como objetivo aplicar las lecciones aprendidas de la experiencia de mantenimiento pasada a situaciones futuras. Esto incluye mejores especificaciones, precisión en la reconstrucción, el análisis de piezas defectuosas y el análisis de la causa raíz de los fallos [5].

Modo de fallo: Forma en la que se produce un fallo [3]

Ocurrencia de fallo: Probabilidad de que un fallo ocurra en un periodo de tiempo determinado [3].

Severidad del fallo: Clasificación relativa de las consecuencias potenciales de un fallo [3].

Tasa de fallos: El número esperado de fallos de un tipo determinado en un intervalo de tiempo dado. La tasa de fallos varía con el tiempo [6].

4.2. Abreviaturas

AMFE: Análisis de modos de fallos y de sus efectos.

AMFEC: Análisis de modos de fallos, de sus efectos y de su criticidad.

EPRI: Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (*Electric Power Research Institut*).

IAEA: Organismo Internacional de Energía Atómica (*International Atomic Energy Agency*).

INPO: Instituto de Operaciones de Energía Nuclear (*Institute on Nuclear Power Operations*).

IPR: Índice de Prioridad de Riesgo.

MTBF: Tiempo medio entre fallos (*Mean time to failure*).

PSE: Pérdida de suministro eléctrico exterior.

PWE: Reactor de agua presurizada (*Pressurized water reactor*).

RCM: Mantenimiento centrado en la fiabilidad (*Reliability centred maintenance*).

5. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA FIABILIDAD (RCM)

5.1. Evolución del mantenimiento hasta el RCM

El mantenimiento ha variado mucho en los últimos años, estos cambios se deben al gran aumento en número y variedad de los activos físicos que deben ser mantenidos, más complejidad en los diseños y expectativas cambiantes. Estas expectativas recaen en una mayor conciencia a la hora de evaluar hasta qué punto los fallos en los equipos afectan a la seguridad y al medio ambiente, conciencia sobre la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, el alcanzar la máxima disponibilidad posible de los equipos y siempre buscando una relación favorable de coste.

La historia del mantenimiento se puede diferenciar en tres generaciones, la primera cubre el periodo que se extiende hasta la Segunda Guerra Mundial la cual se caracteriza por la idea de "reparar cuando algo se rompe", lo que se conoce actualmente como mantenimiento correctivo. La segunda generación, que comienza con el estallido de la Segunda Guerra Mundial, donde se observa un aumento de la mecanización debido a la falta de personal que iba a la guerra y la alta demanda de todo tipo de bienes. La alta dependencia de las máquinas, hizo concentrar la atención en los tiempos de indisponibilidad, lo que llevó a la idea de que los fallos de los equipos debían ser prevenidos. Aparece por primera vez el concepto de mantenimiento preventivo, donde se busca una mayor disponibilidad de la planta, mayor vida de los equipos y menor coste.

La tercera y última generación, que comienza a mediados de los años 70, es cuando aparecen nuevas investigaciones y técnicas que revolucionan el mundo del mantenimiento industrial. Se empieza a ver menos evidente la conexión entre la edad de los activos y la probabilidad de que estos fallen [7].

A continuación, en la figura 5.1, se muestra la curva de "bañera" a lo largo de los años y las generaciones, donde se ilustra la visión que se tenía en relación con la edad y la probabilidad de que fallen los activos. En cada curva de "bañera", que se muestra en la figura 5.1, el eje vertical que corresponde a la tasa de fallos (probabilidad de que fallen), y el eje horizontal al tiempo.

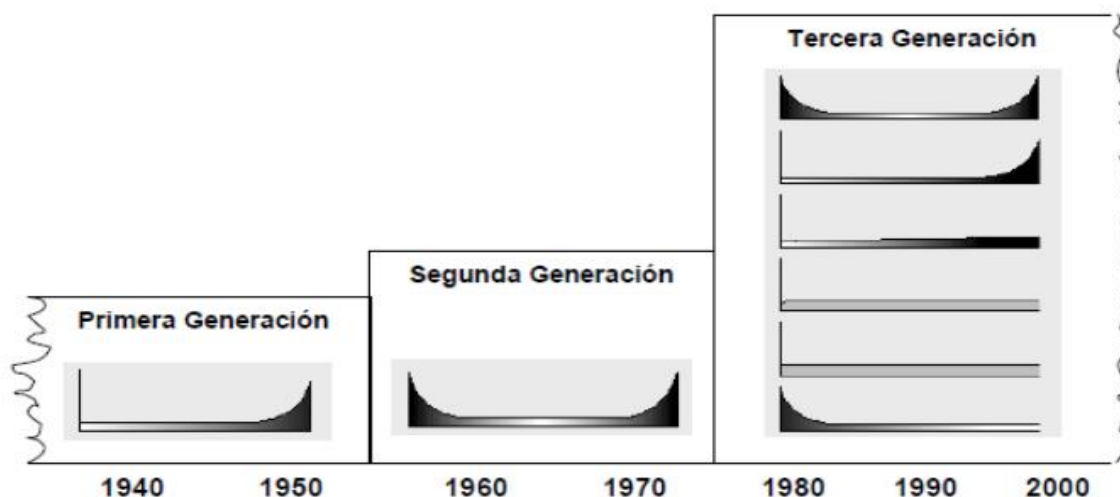


Figura 5.1. Diferentes curvas de "bañera" según la generación. [7]

Como se puede observar en la figura 5.1, en la primera generación se creía en que la probabilidad de que un equipo fallara tan solo dependía de su envejecimiento, mientras que, en la segunda generación, apareció el término de mortalidad infantil. Esta se

caracteriza por tener probabilidades de fallo iniciales elevadas pero que disminuyen con el paso del tiempo. Esto puede ser debido a diferentes factores: Errores de ensamblaje, equipos defectuosos, una instalación incorrecta entre otros.

Sin embargo, las investigaciones llevadas a cabo en la tercera generación revelan seis patrones distintos de fallo, donde se concluye que muchas de las tareas que se creían necesarias, no aportan ningún beneficio. Esto genera uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta el personal de mantenimiento de una planta, el de decidir qué tareas merecen la pena y cuáles no para sus equipos.

Seguidamente, en la figura 5.2, se muestran estas curvas de "bañera" junto con el porcentaje de equipos que se ajustan a cada uno de los seis patrones de probabilidad de fallo. En las diferentes curvas de "bañera" que se observan en la figura 5.2, en sus ejes verticales se representa la tasa de fallo (probabilidad de fallo) y en sus ejes horizontales, el paso del tiempo. También se puede observar a la derecha de las curvas, la probabilidad de que un equipo tenga un tipo de distribución de falla frente al tiempo según diferentes bibliografías.

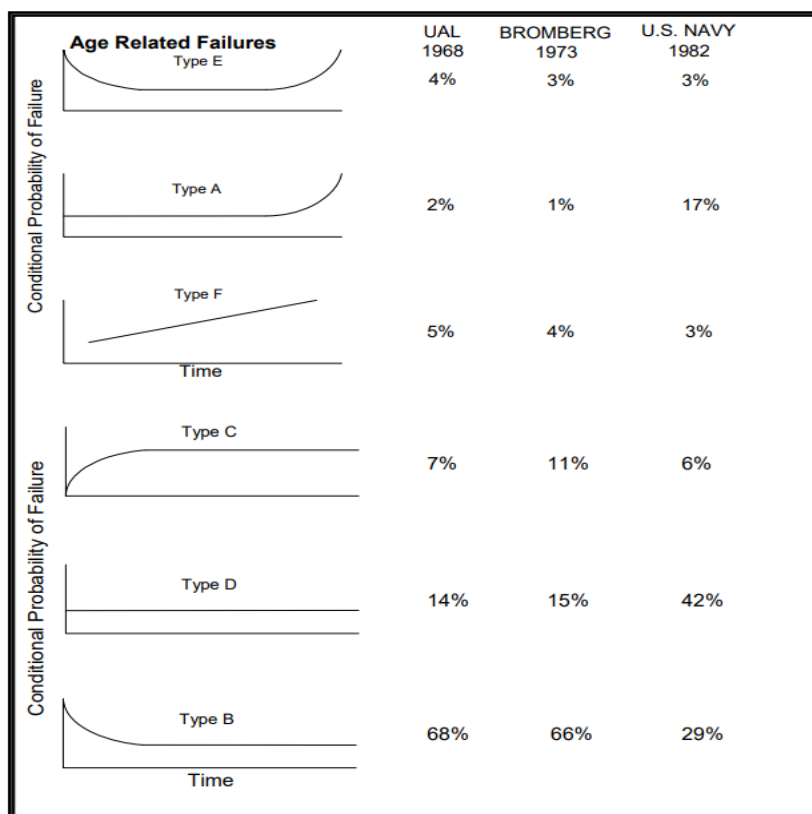


Figura 5.2. Diferentes patrones de probabilidad de fallo [8].

5.2. Nuevas técnicas de mantenimiento

A lo largo de las tres generaciones se han desarrollado diferentes técnicas de mantenimiento que han conseguido una mayor disponibilidad y fiabilidad de los equipos, una mayor seguridad, mejor calidad del producto, reducir el daño al medio ambiente, aumentar la vida de los equipos y una buena relación coste-eficacia.

A continuación, en la figura 5.3, se muestra la evolución de estas técnicas de mantenimiento a lo largo de las generaciones.

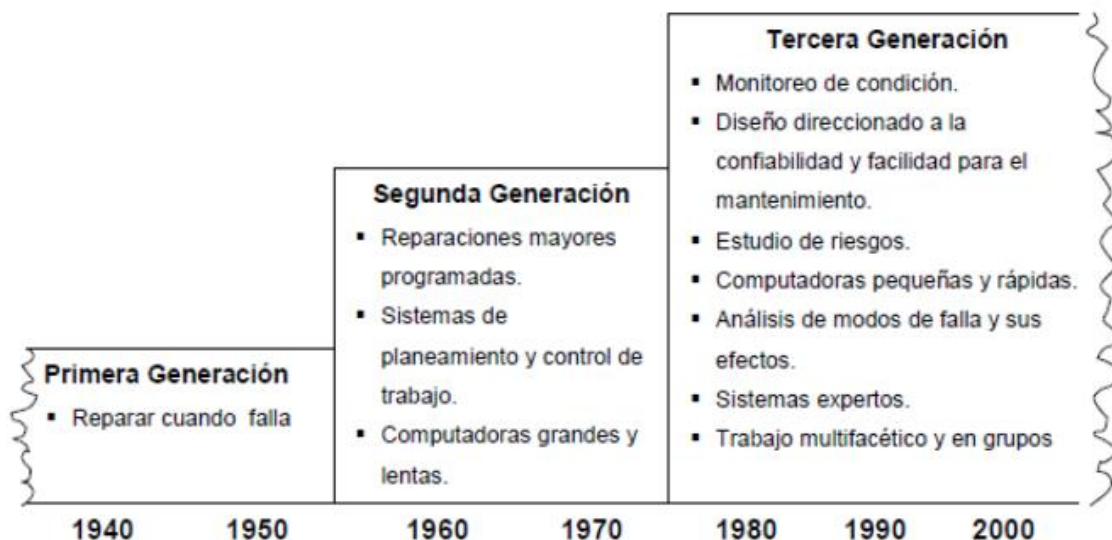


Figura 5.3. Técnicas de mantenimiento a lo largo de las generaciones. [7]

Con la entrada de la tercera generación y sus investigaciones y el aumento de los accidentes aéreos apareció por primera vez lo que se conoce como **mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM)** de sus siglas en inglés *reliability centred maintenance*. Hasta la fecha de hoy, no existe ninguna otra técnica de mantenimiento capaz de determinar la cantidad mínima segura de tareas que deber realizarse para preservar las funciones de los equipos [7].

5.3. Introducción al mantenimiento centrado en la fiabilidad

El mantenimiento centrado en la fiabilidad es una estrategia que busca aumentar la probabilidad de que un activo funcione de la manera requerida durante su ciclo de vida de diseño con una cantidad mínima de mantenimiento y tiempo de inactividad, es decir, priorizando la fiabilidad [8]. Esta metodología busca identificar todas las causas posibles que puede provocar un fallo en el sistema o equipo utilizando relaciones de causa y efecto.

Esta no es una metodología nueva como tal si no que es una estrategia que combina el mantenimiento correctivo, el preventivo, el predictivo y el proactivo con el fin de aumentar la fiabilidad del equipo o sistema propuesto a estudio. La combinación de todas estas técnicas proporciona un potente conjunto de capacidades que permiten obtener una visión integral del estado del equipo.

A continuación, en la tabla 5.1, se muestra la combinación de las diferentes técnicas de mantenimiento que hacen efectivo el RCM.

Tabla 5.1. Combinación de diferentes técnicas de mantenimiento en RCM [1].

Mantenimiento centrado en la fiabilidad	
<p>Mantenimiento correctivo: Conocido también como <i>run to failure</i> donde se analiza si alguna función de la instalación se vería afectada por el fallo frente al coste. Si la respuesta es no, es más rentable reparar el equipo o los componentes afectados cuando estos ya hayan fallado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Maquinaria pequeña No crítica Pocas fallas
<p>Mantenimiento preventivo: Este es el enfoque más básico, se trata de programar las tareas en</p>	<ul style="list-style-type: none"> Piezas desgastadas Patrón de fallos conocido

Mantenimiento centrado en la fiabilidad	
función del tiempo transcurrido desde la última vez que se realizó (PM).	
Mantenimiento predictivo: Basado en pruebas e inspecciones predictivas. Se recogen y se analizan datos en tiempo real (monitorización) para determinar cuándo un componente requiere mantenimiento.	<ul style="list-style-type: none"> • No sujeto a desgaste • Fallo aleatorio
Mantenimiento proactivo: Este se basa en la identificación y corrección de las causas que originan los fallos en los equipos.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis causa raíz del fallo • AMFE/AMFEC

A continuación, en la figura 5.4, se muestra el árbol lógico de RCM [9] con la combinación de las diferentes técnicas de mantenimiento expresadas en la tabla 5.1.

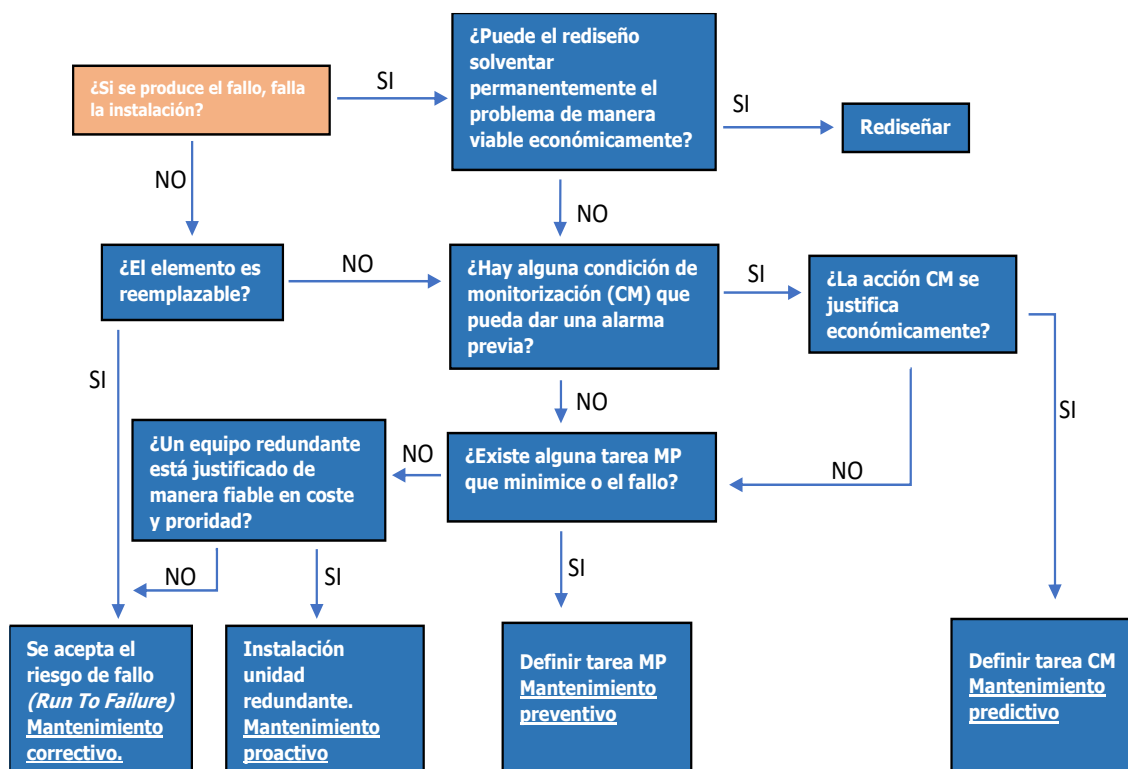


Figura 5.4. Árbol lógico RCM.

Cualquier RCM debe formularse siete preguntas [7] acerca del activo que se desea revisar:

1. ¿Cuáles son las funciones y los niveles de desempeño asociados al activo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué manera puede fallar al cumplir sus funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada fallo funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada fallo?

5. ¿En qué sentido es importante cada fallo?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada fallo?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

El análisis modal de fallos, efectos y su criticidad (AMFEC) que se realiza en este proyecto cubre prácticamente todas las preguntas que uno se debe realizar a lo hora de efectuar un mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM). Este análisis engloba principalmente la técnica predictiva y proactiva.

5.4. Beneficios del mantenimiento centrado en la fiabilidad

Las ventajas principales del mantenimiento centrado en la fiabilidad se basan en el aumento de la seguridad y de la fiabilidad, la reducción de costes, la programación y la eficiencia.

A continuación, en la tabla 5.2, se muestran los beneficios de la implantación de RCM.

Tabla 5.2. Beneficios de la implantación de un RCM [8].

Beneficios del RCM	
Seguridad	Promueve la acción temprana y decisiva, así como la documentación exhaustiva.
Fiabilidad	Mediante retroalimentación de la experiencia de mantenimiento y los datos sobre el estado del equipo, se busca la mejora continua de las especificaciones de los equipos.
Costes	Aunque el coste de inversión inicial puede ser algo elevado, éste se ve amortizado muy rápidamente al reducir la tasa de fallos y la reducción de tareas de mantenimiento preventivo por la monitorización de la condición en la mayoría de los casos. Reducción de los costes de reparación y mantenimiento total.
Programación	Al tender a proponer un mantenimiento basado en la condición haciendo uso de monitorización, reduciendo mantenimiento innecesario programado, proporciona tiempo para prever y planificar el mantenimiento, la obtención de piezas de repuesto (optimización de stock) y la organización de las condiciones operativas antes de realizar el mantenimiento.
Eficiencia	La flexibilidad del RCM asegura que se realice el tipo de mantenimiento adecuado en el equipo cuando sea necesario. Si el mantenimiento existente no es rentable, se identifica, y no se realiza.

Como se ha comentado en el apartado de objetivos de este informe y en la tabla 5.2, con este proyecto se busca pasar de un mantenimiento puro sistemático del Central Nuclear XX a uno centrado en la fiabilidad, tendiendo siempre que sea posible, a proponer un mantenimiento basado en la condición, obteniendo los beneficios que se expresan en la tabla 1.5.2. Se propondrá la monitorización de los modos de fallo detectados en el análisis AMFEC y se identificarán las tareas actuales que no son eficientes junto con su acción de mejora.

6. ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE)

El análisis modal de fallos y efectos (AMFE) es un método que permite identificar fallos en equipos, así como evaluar y clasificar de manera objetiva sus efectos, causas y elementos de identificación para evitar su ocurrencia y tener un método documentado de prevención.

Este análisis tiene como objetivo apoyar las decisiones que hacen reducir la probabilidad de que se produzcan los fallos y sus efectos. Con esto se consigue aumentar la fiabilidad del equipo en cuestión y reducir costes de adquisición y explotación.

Uno de los atractivos más fuertes de este método es su sencilla adaptación a cualquier tipo de industria u organización y que puede llevarse a cabo varias veces para el mismo equipo a lo largo de su vida y conseguir así mejoras en el mantenimiento y la fiabilidad a largo plazo.

Dentro del AMFE se incluyen los controles y tareas de mantenimiento ya existentes para el equipo y las acciones que se recomiendan para atacar las causas que producen estos modos de fallo y reducir así la probabilidad de que estos aparezcan.

Este análisis puede adaptarse y aplicarse de diferentes maneras en función de los objetivos que se precisen. Una de las adaptaciones más utilizadas en la industria y la que se utilizará en este proyecto es el análisis modal de fallos, efectos y su criticidad (AMFEC) el cual se caracteriza por la priorización de la criticidad de los modos de fallo, es decir, identificar que modos de fallo son más críticos para el equipo y actuar en ellos con prioridad. Para definir esta criticidad, se utiliza el método conocido como Índice de Prioridad de Riesgo (IPR) que se obtiene a través de la multiplicación del grado de ocurrencia, severidad y no detección del modo de fallo. En el apartado 6.1.2.7 se entra más en detalle sobre este índice. Con el IPR se provee la prioridad con la que se debe atacar cada modo de fallo [6].

A continuación, se muestra una guía detallada para la realización del análisis AMFE.

6.1. Guía para la realización del AMFE

Para la realización de esta guía, se hace uso de la normativa europea IEC 60812:2018 [3] donde se especifican todos los pasos a seguir para poder efectuar un análisis AMFE de manera correcta.

En este apartado se describen las distintas actividades requeridas para realizar un análisis modal de fallo y de sus efectos. Dichas actividades se detallan en el siguiente flujograma, figura 6.1. Se debe tener en cuenta que las actividades se realizan de forma secuencial, pero puede haber iteraciones, por ejemplo, cuando el AMFE se realiza sobre un equipo sujeto a cambios.

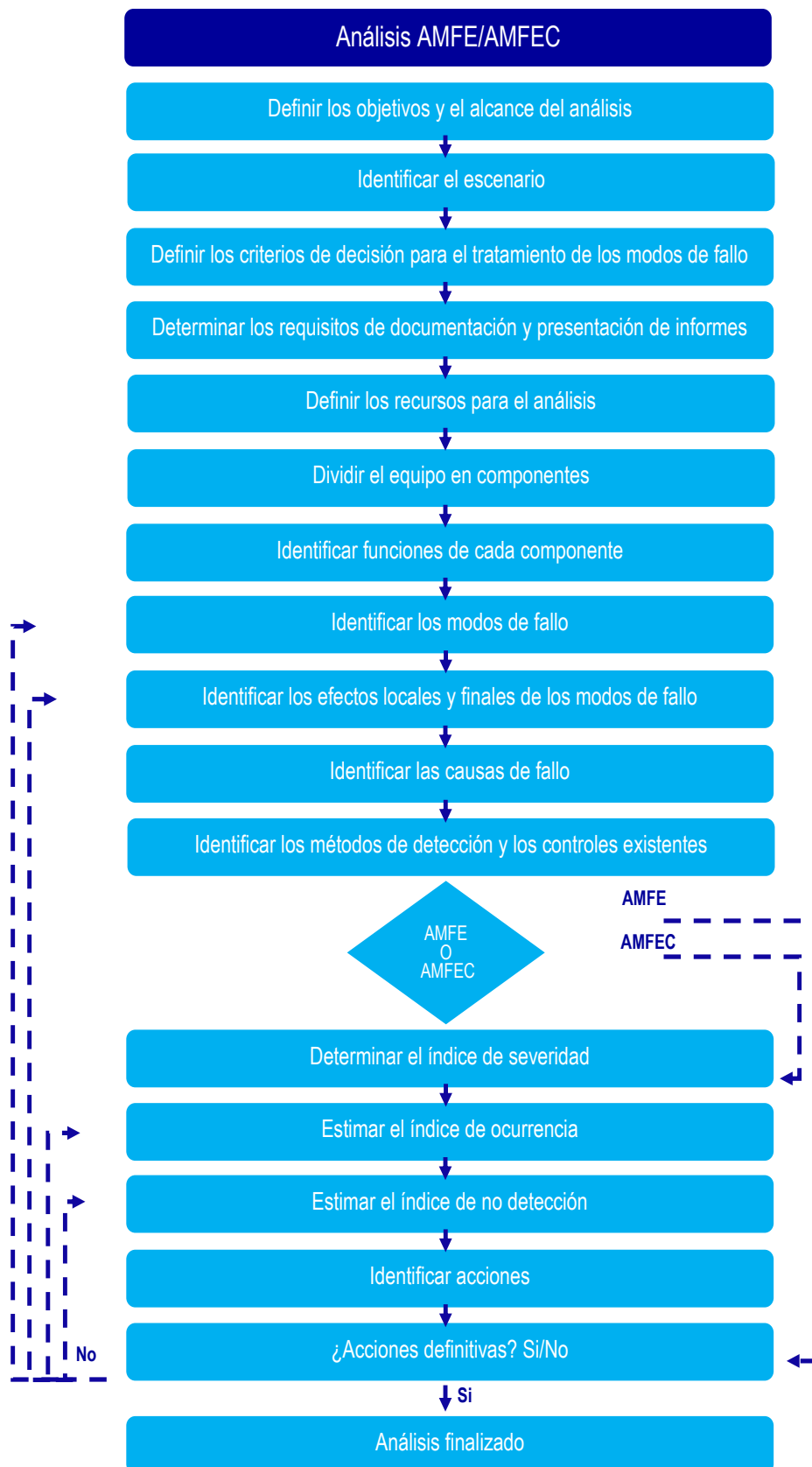


Figura 6.1. Flujograma del análisis AMFE/AMFEC

6.1.1. Planificación del AMFE

La planificación de un AMFE implica considerar el por qué se va a realizar el análisis, qué componentes del equipo se analizarán, en qué condiciones y cómo debe realizarse de manera eficaz y eficiente.

A continuación, se explican detalladamente los pasos para llevar a cabo la fase de planificación.

6.1.1.1 *Definición de los objetivos y alcance del análisis*

El primer paso consiste en definir los objetivos que permitan enfocar el análisis para que el resultado se ajuste a ellos, además de definir las bases del esfuerzo que determinan la profundidad del análisis.

Los objetivos definidos también describen el motivo del análisis y permiten evaluar el análisis como exitoso o no.

Se deberá definir el alcance del estudio y el nivel de subdivisiones puesto que un AMFE puede realizarse a cualquier subdivisión de un equipo.

A continuación, se muestra un ejemplo en ventiladores centrífugos para facilitar el entendimiento de este punto. Más adelante, en el apartado 10.2 se realiza el estudio completo.

El alcance deberá responder a las siguientes preguntas:

- **¿Qué equipos se incluyen en el análisis?**

Ejemplo de respuesta. Ventiladores centrífugos

- **¿Hasta dónde se realizará el análisis?**

Ejemplo de respuesta. Ventilador, acoplamiento y reductor de velocidad.

- **¿Cuál es la profundidad del análisis?**

Ejemplo de respuesta. Componentes más relevantes, sin llegar a subdividirlos. Eje, rodamientos, rodete...

6.1.1.2 *Identificación del escenario (contexto operacional)*

Los escenarios de uso del equipo se deben definir con suficiente detalle para facilitar la identificación de todos los modos de fallo posibles, como, por ejemplo, condiciones de funcionamiento normales o en condiciones de emergencia. En la definición del escenario se deberán incluir las condiciones del entorno, las ambientales, las creadas por otros equipos y/o actividades próximas.

A continuación, se muestra un ejemplo en ventiladores centrífugos para facilitar el entendimiento de este punto. Más adelante, en el apartado 10.2 se realiza el estudio completo.

Para resolver este apartado, se deberá responder a la siguiente pregunta:

- **¿Cuál es el contexto operacional del equipo?**

Condiciones de operación normales. Condiciones de entorno, ambientales y creadas por equipos y/o actividades próximas, favorables.

6.1.1.3 Definición de criterios de decisión para el tratamiento de los modos de fallo

Deben definirse los tipos de consecuencias que son relevantes para el análisis, ya sean de impacto económico, de seguridad o efectos intangibles como la pérdida de reputación.

Estos criterios suelen tener en cuenta la gravedad del efecto de fallo en los objetivos y funciones del equipo, así como los beneficios y costes relativos de las opciones de tratamiento.

Si se precisa, se puede realizar un análisis basado en la criticidad, de modo que a cada modo de fallo se le asigne un nivel de criticidad basado en la severidad del efecto del fallo sobre las funciones del sistema, la probabilidad de que el modo de fallo pueda producirse y la capacidad de detectar del modo de fallo a tiempo para prevenir o mitigar el efecto. La combinación de estos tres factores proporciona un índice conocido como Índice de Prioridad de Riesgo (IPR).

El IPR es una herramienta útil a la hora de priorizar en la gestión de los modos de fallo ya sea por limitaciones en términos de coste, de tiempo o de seguridad. Este método es el conocido como análisis de los modos de fallos, de sus efectos y de su criticidad (AMFEC).

Ejemplos centrales nucleares

Tal y como se observa en el capítulo 3.3.8 del INPO AP-913 Rev.4 [10], se priorizará basándose en la seguridad de la planta, el impacto operativo y la disponibilidad de la estación. Este punto de vista será útil en la definición de los índices de prioridad de riesgo.

6.1.1.4 Determinación de los requisitos de documentación y presentación de informes

A la hora de realizar el informe, se deberá introducir toda la información relevante utilizada y producida durante el análisis. Se describirá cómo se espera que se utilicen los resultados, la documentación que pueda servir para fundamentar las decisiones y la justificación de la adaptación del análisis (excepciones, suposiciones...) incluido el método utilizado para la clasificación de la criticidad.

Dado que se espera que AMFE sea un análisis iterativo, la documentación se debe actualizar y revisar periódicamente lo largo de la vida del equipo objeto del análisis.

6.1.1.5 Definición de los recursos para el análisis

Para la realización de un correcto AMFE, se requiere de personal con la competencia técnica y las habilidades para aplicar el método, la comprensión de los aspectos técnicos del equipo a analizar y de sus modos de fallo y efectos. Es aconsejable disponer de un equipo multidisciplinar para darle un enfoque más completo al análisis.

6.1.2. Análisis AMFE/AMFEC

A continuación, se explican detalladamente los pasos para llevar a cabo el análisis.

6.1.2.1 División del equipo o proceso en componentes

El nivel de detalle de los resultados estará relacionado con el nivel de desglose de la división del equipo en componentes y la subdivisión de estos componentes. Por ejemplo, se puede hacer la división de un equipo en componentes como un rodamiento y después la subdivisión de este rodamiento en sus elementos (aro exterior, elementos rodantes, jaula...). Es decir, todo esto dependerá de la exactitud con la que se deseen de los resultados y el tiempo disponible para la realización del análisis.

6.1.2.2 Identificación de las funciones de cada elemento

Una vez identificado el equipo propuesto a estudio, se requiere de información exhaustiva de todas las funciones de cada componente que forma parte del AMFE. Cada función del componente debe tratarse por separado.

A continuación, se muestra un ejemplo del eje en ventiladores centrífugos para facilitar el entendimiento de este punto. Más adelante, en el apartado 10.2 se realiza el estudio completo.

Para resolver este apartado, se realizará la siguiente pregunta:

- **¿Qué función se vería afectada si fallara el componente eje?**

Respuesta. La función de guiar el movimiento de rotación del ventilador.

6.1.2.3 Identificación de los modos de fallo

En este apartado se identificarán las formas en que cada componente del equipo podría no cumplir con su función. Cada componente puede tener varias formas de fallar y cada una de ellas debe de estudiarse por separado.

La identificación del modo de fallo puede obtenerse de la siguiente manera:

- En referencia a otros elementos con función, estructura y condiciones similares. (A partir de estudios AMFE anteriores, realizando siempre comprobaciones respecto a discrepancias que puedan dar modos de fallo diferentes entre el equipo y sus componentes propuestos a estudio y los estudiados.)
- Experiencia operativa.
- Guías basadas en modos de fallo genéricos para componentes específicos.
- Base de datos de accidentes, mantenimiento y reparación.
- Conocimiento del equipo y sus componentes.

Para que no se creen discrepancias en la identificación de los modos de fallo, se seguirán los siguientes pasos:

A continuación, se muestra un ejemplo en ventiladores centrífugos para facilitar el entendimiento de este punto. Más adelante, en el apartado 10.2 se realiza el estudio completo.

- **¿Cuál es la función del rodamiento?**

Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el giro.

- **¿Qué le puede pasar al rodamiento para que deje hacer su función (modo de fallo)?**

Erosión eléctrica, contaminación, sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes, lubricación, desalineación entre los elementos rodantes y la pista...

- **Siempre se indicará en qué lugar sucede el modo de fallo**

Erosión eléctrica en los caminos de rodadura y en los elementos rodantes.

- **No se optará por ir directamente al modo de fallo funcional.**

En vez de identificar como modo de fallo "el rodamiento no gira", identificar el por qué dejaría de hacerlo.

6.1.2.4 Identificación de los efectos locales y finales de los modos de fallo

Los efectos de fallo son la consecuencia que produce cada modo de fallo, a veces el mismo efecto puede ser causado por uno o más modos de fallo. Por ejemplo, en un rodamiento, el efecto de vibración lo puede causar tanto un modo de fallo por lubricación como uno por desalineación.

Se deberá diferenciar los efectos locales, que es el que se produce en el componente, y el efecto final, que es el que se produce en el equipo. La identificación de los efectos finales es importante a la hora de considerar la importancia relativa de los fallos.

6.1.2.5 Identificación de las causas del fallo

Se deberán identificar las causas que provocan los modos de fallo para reducir así la probabilidad de que estos ocurran. Se prestará especial atención a las fuentes de fallos de causa común, es decir, aquel fallo que hace fallar a más de un componente de manera simultánea o que hace fallar al dispositivo de control.

El error humano también se introducirá como causa de fallo cuando este sea requerido.

La normativa UNE-EN 62740:2015 [11] que se basa en la obtención de la causa raíz (RCA), es una herramienta muy útil para esta etapa del AMFE. Una de las técnicas que indica este método es el preguntarse el "qué puede suceder", "cómo puede suceder" y finalmente "por qué puede suceder". Respondiendo estas preguntas, se consigue obtener la causa que produjo el evento foco.

6.1.2.6 Identificación de los métodos de detección y los controles existentes

Para cada modo de fallo detectado, deben identificarse los controles y métodos de detección ya existentes, tareas de prevención, monitorización.... Si estos se consideran inadecuados o insuficientes deberán determinarse y mejorarse o simplemente utilizar nuevos métodos.

De otro modo, también se deberán plasmar las características de diseño existentes que tengan la capacidad de prevenir o reducir la probabilidad de que se produzca el modo de fallo.

6.1.2.7 Evaluación de la importancia relativa de los modos de fallo

En este apartado se deberán seguir dos pasos diferentes si se realiza un AMFE convencional o un AMFEC. Si se opta por el AMFE convencional, se identificarían directamente las acciones pertinentes para mitigar o prevenir los modos de fallo y sus efectos.

Si se opta por realizar un AMFEC, opción escogida para la realización de este proyecto, se deberá identificar la criticidad de los modos de fallo antes de identificar las acciones pertinentes. Se presentará un resultado en forma de lista de todos los modos de fallo priorizados por orden de criticidad.

El método que se utilizará para determinar la criticidad de los modos de fallo es el IPR.

La obtención del Índice de Prioridad de Riesgo se basa en la combinación por partes iguales de la severidad del efecto del fallo sobre las funciones del sistema (S), la

probabilidad de que el modo de fallo pueda producirse (O) y la capacidad de detectar el modo de fallo (D).

$$IPR = S \times O \times D \quad (6.1)$$

Severidad (S)

La severidad que se determine para cada modo de fallo de los componentes deberá representar la importancia de su efecto en el nivel superior (el efecto final), es decir en el equipo, proceso u objetivos operativos.

Ocurrencia (O)

La probabilidad de que se produzca un modo de fallo se estimará mediante:

- Históricos del equipo (acciones correctivas para los modos de fallo, tasas de fallo, indisponibilidad...).
- Seguimiento de la monitorización.
- Experiencia operativa.
- Datos de fallos de equipos similares en la industria.

No detección (D)

Para el índice de no detección se le dará más importancia a los modos de fallo que no dispongan de medios para ser detectados antes de se produzcan las consecuencias adversas.

Se puede hacer uso de variaciones de la ecuación 6.1, como, por ejemplo, no hacer uso del índice de no detección y centrar la criticidad en los dos índices restantes.

Los valores de (S), (O) y (D), suelen tener rangos de 1 a 10, obteniendo un valor del IPR en rangos de 1 a 1000 o 1 a 100 si se ha utilizado solo dos índices.

Se crearán tablas donde para cada índice, se le dará un valor de 1 a 10 basándose en referencias en la industria, experiencia operativa o criterio propio. Para (S), 10 será el valor que se le asignará a una severidad de efecto de fallo más alta y 1 a la más baja. Para (O), el mismo razonamiento que para (S) mientras que para (D), se le asignará un valor de 1 a la capacidad más alta detección, lo fácil que es detectar un modo de fallo antes de que aparezca, ya sea por el control o la monitorización existente o porque simplemente se puede detectar de manera visual, y 10 a la capacidad de no detección más alta.

Cuando se obtengan dos IPR iguales o muy similares, se priorizará por la severidad.

En este proyecto, la obtención del índice de ocurrencia se realizará mediante tasas de fallo por históricos de mantenimiento de la planta o por datos bibliográficos. La tasa de fallos equivale al número de fallos en un periodo considerado tal y como se observa en la ecuación 1.6.2.

$$\lambda = \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{\text{Periodo considerado}} \quad (6.2)$$

Donde:

λ : Tasa de fallos (nº de fallos/año).

6.1.2.8 Identificación de acciones

Los tratamientos que se recomendarán tienen que cumplir con al menos uno de estos aspectos:

- La eliminación del modo de fallo.
- La reducción de la probabilidad del modo de fallo.
- La eliminación o reducción de los efectos del modo de fallo.
- La reducción del índice de no detección del modo de fallo.

En cuanto a los medios de control existentes que sean ineficaces o innecesarios, se recomendará su eliminación.

Finalmente, lo ideal sería una retroalimentación del análisis con las acciones propuestas y se observar si se ha reducido el IPR y se han reducido o eliminado los modos de fallo y sus efectos.

A continuación, en la figura 6.2 se muestra el modelo de plantilla creado para la realización del análisis.

Plan de fiabilidad de equipos en ventiladores centrífugos

Compañía interesada: -		Fecha de inicio: - de - del -		Revisor por: -		Versión: -								
Cód. id. Equipo: -		Autor: -		Aprobado por: -		Fecha de aprobación: - de - del -								
Análisi AMFEC								cód. id. Equipo	Índices Actuales					
				Fallo										
Equipo	Función del equipo	Componente	Función del componente	Modo	Efecto (local)	Efecto (final)	Causa	Controles actuales (tareas)	Severidad	Ocurrencia	No detección	IPR	Posibles acciones (PM y de monitorización)	Plan de mantenimiento

Figura 6.2. Modelo de plantilla creado para la realización del análisis modal de fallos, efectos y criticidad (AMFEC).

7. ANÁLISIS DE PARETO

El análisis de Pareto es una herramienta muy útil para conocer el orden de importancia de las variables que intervienen en un estudio. En este caso, se utilizará para determinar qué modos de fallos de los estudiados son de mayor relevancia y poder así centrar el plan de mantenimiento en mitigarlos.

Esta metodología, conocida también como ley del 80-20, indica que el 20 % de las causas son las responsables del 80 % de los efectos. En este caso, una vez indexados los modos de fallo utilizando el IPR, según Pareto, si se trata el 20 % de los modos de fallo más relevantes, se cubrirá como mínimo el 80 % de los fallos del ventilador.

Utilizando este análisis, se pretende focalizar el plan de mantenimiento a cubrir los modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del equipo.

Para realizar el diagrama de Pareto se seguirán los siguientes pasos:

- Obtener el IPR de todos los modos de fallo estudiados en el análisis AMFEC para cada equipo.
- Se ordenarán los modos de fallo de mayor a menor según el IPR.
- Se calculará el porcentaje equivalente de cada IPR respecto a la suma total de los IPR.
- Se realizará el porcentaje acumulado de los IPR para cada modo de fallo.
- Se representará el diagrama de Pareto. En los ejes verticales aparecerá el IPR y el porcentaje acumulado de IPR de cada modo de fallo y en el eje horizontal los modos de fallo.

A continuación, en la tabla 7.1, se muestra un ejemplo de aplicación del análisis de Pareto con datos ficticios de modos de fallo y de IPR para facilitar el entendimiento de esta metodología. Más adelante, en los apartados 10.4 y 10.5 se realiza el análisis de Pareto real de los ventiladores.

Tabla 7.1. Ejemplo de aplicación del análisis de Pareto.

Modos de fallo	IPR	% Acumulado IPR	% IPR
Modo de fallo A	250	25%	25%
Modo de fallo B	220	48%	22%
Modo de fallo C	150	63%	15%
Modo de fallo D	90	72%	9%
Modo de fallo E	85	81%	9%
Modo de fallo F	82	89%	8%
Modo de fallo G	50	94%	5%
Modo de fallo H	45	99%	5%
Modo de fallo I	10	100%	1%
Total	982		100%

A continuación, en la figura 7.1, se muestra una representación de los datos obtenidos en la tabla 7.1. En la representación se puede observar que los modos de fallo que provocan el 80 % de los fallos son el modo de fallo A, B, C y D.

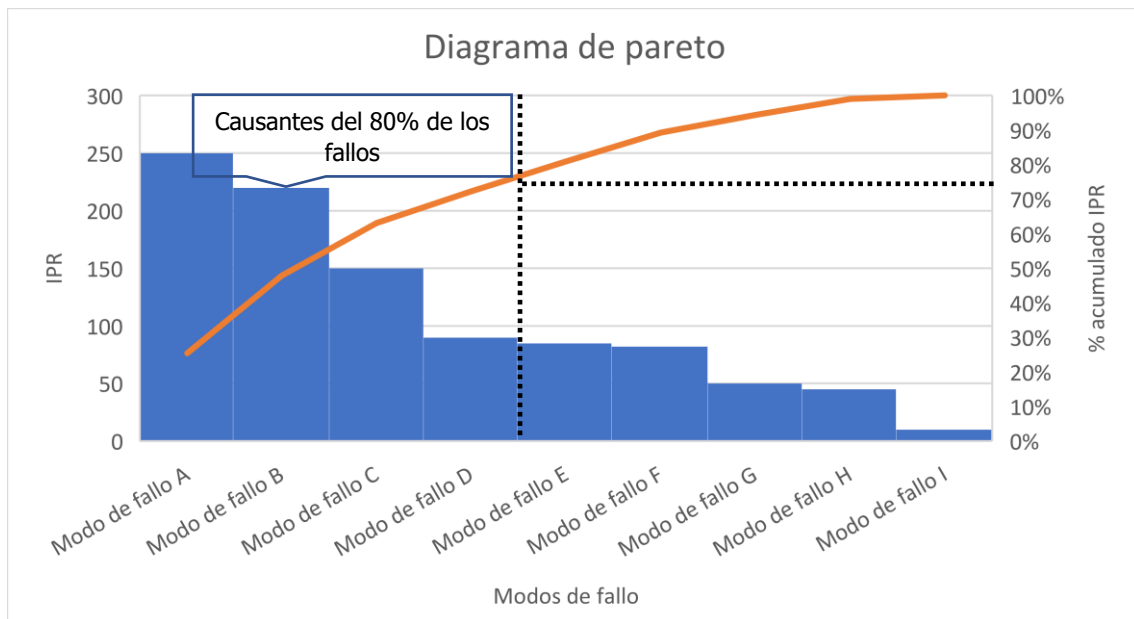


Figura 7.1. Diagrama de Pareto explicativo.

8. ANÁLISIS DE WEIBULL

Es frecuente que los equipos a lo largo de su vida se comporten de la manera que se describe en la figura 8.1, en ella se pueden diferenciar tres zonas principales [12]:

Zona 1 (mortalidad infantil): Este es un periodo en el que la probabilidad de fallo disminuye con el tiempo. Los fallos suelen ir asociados a problemas de fabricación, montaje, almacenamiento o transporte. A medida que pasa el tiempo, la tasa de fallo disminuye hasta llegar a la zona 2.

Zona 2 (madurez. Periodo de vida útil): El periodo de vida útil se caracteriza por una tasa de fallos prácticamente constante, los fallos se producen de manera aleatoria. Suele ser el período de tiempo donde se aconseja estudiar el equipo y sus componentes. Finalmente se llega a la zona 3.

Zona 3 (envejecimiento): En este periodo la tasa de fallos empieza a crecer debido a que los componentes fallan por degradación, desgaste o envejecimiento. La tasa de fallos, las averías y los costes de mantenimiento se disparan.

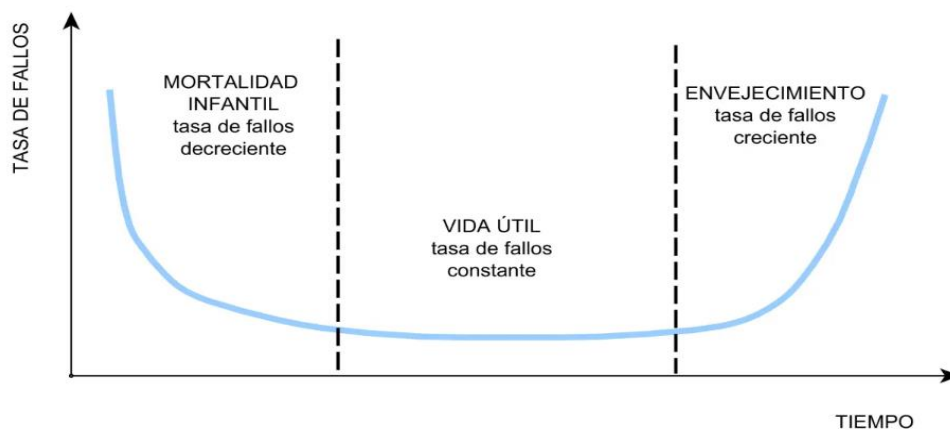


Figura 8.1. Curva característica de la vida de un equipo "curva de la bañera".

Dependiendo en la zona en la que se encuentre el equipo propuesto a estudio se debe recomendar un tipo de mantenimiento u otro. Por ejemplo, si el equipo se encuentra en la zona 2, vida útil, se esperan fallos de naturaleza aleatoria, por lo que proponer un mantenimiento preventivo no tendría sentido.

Existen diferentes funciones de probabilidad que permiten conocer en qué zona de las comentadas anteriormente se encuentra el equipo en cuestión.

Por adaptabilidad, la distribución de Weibull es la más utilizada para fiabilidad y mantenimiento. Con pocos datos de horas de buen funcionamiento (horas hasta el fallo) se pueden obtener valores muy fiables sobre los estados de vida de los equipos. Una característica muy importante de esta distribución es que puede tomar propiedades de otras distribuciones según los valores que tomen sus parámetros [13].

El análisis de Weibull es una distribución continua definida por tres parámetros, el parámetro de forma (β), que representa la pendiente de la recta que forman los datos de tiempos de buen funcionamiento (tiempo entre fallos) y describe el grado de variación de la tasa de fallos. El parámetro de escala o también conocido como vida característica (η), que representa el tiempo en el que se espera que el 63,3 % de la población falle. Y el parámetro de localización (γ), que representa el intervalo de tiempo inicial en el cual no se producen fallos, por lo que define el punto de partida u origen de la distribución [14].

La pendiente de la recta de Weibull (β) determina que tipo de fallos se asocian a los datos estudiados [15].

Si (β) < 1, se asocia a mortalidad infantil (zona 1 de la curva de la bañera mostrada en la figura 8.1).

Si (β) = 1, se asocia a fallos aleatorios, independientes a la edad (zona 2 de la curva de la bañera mostrada en la figura 8.1).

Si (β) > 1, se asocia a fallos por desgaste (zona 3 de la curva de la bañera mostrada en la figura 8.1).

La expresión de la distribución de Weibull, si se tiene en cuenta que el parámetro de localización (γ) es igual a 0, sigue la siguiente función [14]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{(\beta-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (8.1)$$

Donde:

η = Parámetro de escala o vida característica.

β = Parámetro de forma.

t = Tiempo (horas).

Y el tiempo medio entre fallos (MTBF), que representa el tiempo promedio en el que el equipo propuesto a estudio fallará, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$MTBF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (8.2)$$

γ = Parámetro de localización (tiempo de vida sin fallos previstos), en este caso se supone 0.

8.1. Estimación de parámetros de Weibull

Para realizar la distribución de Weibull en este proyecto, se han recopilado datos de órdenes de trabajo de mantenimiento de carácter correctivo de la Central Nuclear XX, donde se han analizado las horas de buen funcionamiento (horas entre fallos) de los modos de fallo con un IPR más elevados.

Se han seguido los siguientes pasos utilizando un parámetro de localización de $\gamma = 0$. [15]:

- Mediante la fórmula que relaciona la fiabilidad frente a la probabilidad de fallo que se muestra en la ecuación 8.3, se determina la ecuación de la recta de regresión de Weibull.

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (8.3)$$

Donde:

$R(t)$ = Fiabilidad en el tiempo.

$F(t)$ = Probabilidad de fallo en el tiempo.

Con la expresión anterior, se observa que:

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

$$\frac{1}{[1 - F(t)]} = e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\ln\left(\frac{1}{[1 - F(t)]}\right) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\ln\left(\frac{1}{[1 - F(t)]}\right) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\eta)$$

Y finalmente:

$$y = \beta x + a \quad (8.4)$$

Donde:

$$y = \ln\ln\left(\frac{1}{[1 - F(t)]}\right)$$

$$x = \ln(t)$$

$$a = -\beta \ln(\eta)$$

- Se buscan los datos de horas de buen funcionamiento de los modos de fallo con un IPR más elevado y se ordenan de menor a mayor.
- Se calcula el rango medio necesario para representar la distribución de Weibull siguiendo la siguiente expresión [14]:

$$RM = \frac{(i-0,3)}{(N+0,4)} \quad (8.5)$$

Donde:

RM = Aproximación del rango de medio, conocido como *Benard's approximation*.

i = Posición del dato después de ordenarlo de menor a mayor.

N = Total de datos propuestos a estudio.

- Junto con estos datos, se representa la recta de regresión de Weibull y se obtiene el valor de β y η .
- Se calcula la tasa de fallos $\lambda(t)$, que representa el número esperado de fallos de un tipo determinado en una función del tiempo, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (8.6)$$

- A continuación, obtenidos los parámetros de forma y escala de Weibull, se puede obtener el tiempo medio entre fallos MTBF (tiempo en el que se prevé que aparezca la siguiente falla causada por el modo de fallo estudiado), utilizando la ecuación 1.8.2.

Donde el término de $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ se puede obtener mediante tablas, como la que se muestra a continuación, figura 8.2.

LEY DE WEIBULL:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$MTBF = m = E(t) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad \sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]$$

β	$m/\eta = \Gamma(1+1/\beta)$	σ/η	β	$m/\eta = \Gamma(1+1/\beta)$	σ/η
0	∞	∞	2,0	0,8862	0,463
0,1	10!	$\sqrt{20! - (10!)^2}$	2,1	0,8857	0,44
0,2	120	1901	2,2	0,8856	0,42
0,3	9,2605	47	2,3	0,8859	0,41
0,4	3,3234	10,43	2,4	0,8865	0,39
0,5	2,0000	4,472	2,5	0,8873	0,38
0,6	1,5046	2,645	2,6	0,8882	0,37
0,7	1,2658	1,851	2,7	0,8893	0,36
0,8	1,1330	1,428	2,8	0,8905	0,34
0,9	1,0522	1,171	2,9	0,8917	0,33
1,0	1,0000	1,000	3,0	0,8938	0,32
1,1	0,0649	0,878	3,1	0,8943	0,315
1,2	0,9407	0,785	3,2	0,8957	0,31
1,3	0,9235	0,716	3,3	0,8970	0,30
1,4	0,9114	0,659	3,4	0,8984	0,29
1,5	0,9028	0,613	3,5	0,8998	0,28
1,6	0,8966	0,594	3,6	0,9011	0,27
1,7	0,8922	0,530	3,8	0,9038	0,26
1,8	0,8893	0,512	4,0	0,9064	0,25
1,9	0,8874	0,486			

Figura 8.2. Tabla para la obtención del tiempo medio entre fallos MTBF [14].

9. FRECUENCIA ÓPTIMA DE INTERVENCIÓN

La frecuencia óptima de intervención a la hora de realizar el mantenimiento es uno de los puntos más importantes a la hora de crear el plan de mantenimiento de una instalación. Habitualmente, se hace uso de los diagramas de optimización-coste-riesgo (OCR) para determinar cuál es la frecuencia óptima. Este se representa a continuación, figura 9.1.

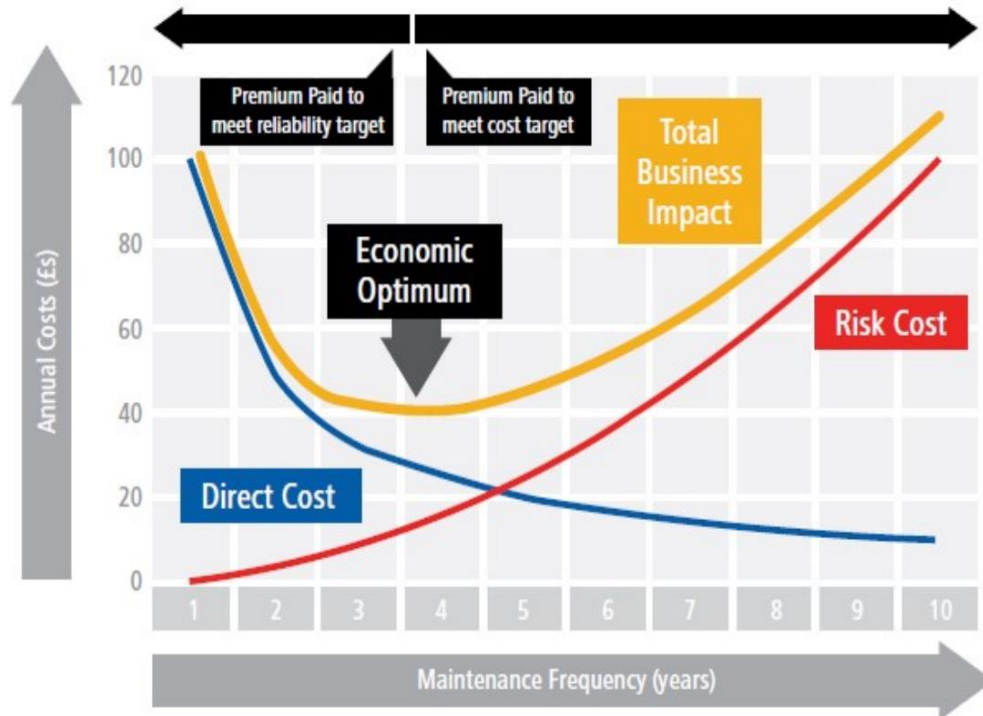


Figura 9.1. Diagrama de optimización-coste-riesgo (OCR) [16].

El diagrama que se muestra en la figura 9.1 lo constituyen tres curvas, la primera, de color rojo, representa el coste del riesgo, que aumenta a lo largo del tiempo. La curva de color azul representa el coste directo del mantenimiento, que disminuye a lo largo del tiempo. La curva de color amarillo representa la suma de las anteriores, cuyo mínimo representará la frecuencia óptima de mantenimiento.

Coste del mantenimiento

Dentro del coste de mantenimiento intervienen varios factores, como puede ser el coste de horas/hombre del personal de mantenimiento, costes de instrumentación necesaria para realizar las tareas, costes administrativos, costes de almacenamiento etc.

Coste del riesgo

El coste del riesgo equivale al total de costes que provocaría el fallo del equipo, ya sea de pérdida de producción, de reemplazo, de indisponibilidad etc. Esto multiplicado por la probabilidad de que falle el equipo durante del tiempo, forma curva de riesgo. Esta probabilidad se puede obtener, por ejemplo, utilizando la distribución de Weibull.

El método de optimización-coste-riesgo (OCR) es un método habitual en el cálculo de frecuencias óptimas de mantenimiento en la mayoría de las industrias, pero las centrales nucleares, a diferencia, se encuentran regidas por diferentes comisiones, instituciones y organismos. Las centrales nucleares españolas pertenecen al organismo internacional de

energía atómica, IAEA, de sus siglas en inglés, cuyas recomendaciones son las aplicadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

La IAEA, es su documento *Applications of Reliability Centered Maintenance to Optimize Operations and Maintenance in Nuclear Power Plants* [17], recomienda que las tareas de revisión general, donde se busca que después de la revisión, el sistema quede a "cero horas" de funcionamiento, es decir, como nuevo, se realicen cada 1/2 de la vida útil del equipo para aquellos que no afectan a la seguridad y 1/3 para los que sí. Esta vida útil la acostumbra a dar el fabricante. Sin embargo, para las tareas de inspección (revisión parcial), va a depender de la disponibilidad requerida del equipo y del tiempo medio entre fallos (MTBF) de este.

A continuación, se muestra una tabla con las frecuencias recomendadas para una revisión parcial según la IAEA. En este caso, la disponibilidad requerida para estos ventiladores es de aproximadamente el 90% por lo que la frecuencia del mantenimiento para las revisiones parciales será aproximadamente 25% del tiempo medio entre fallos.

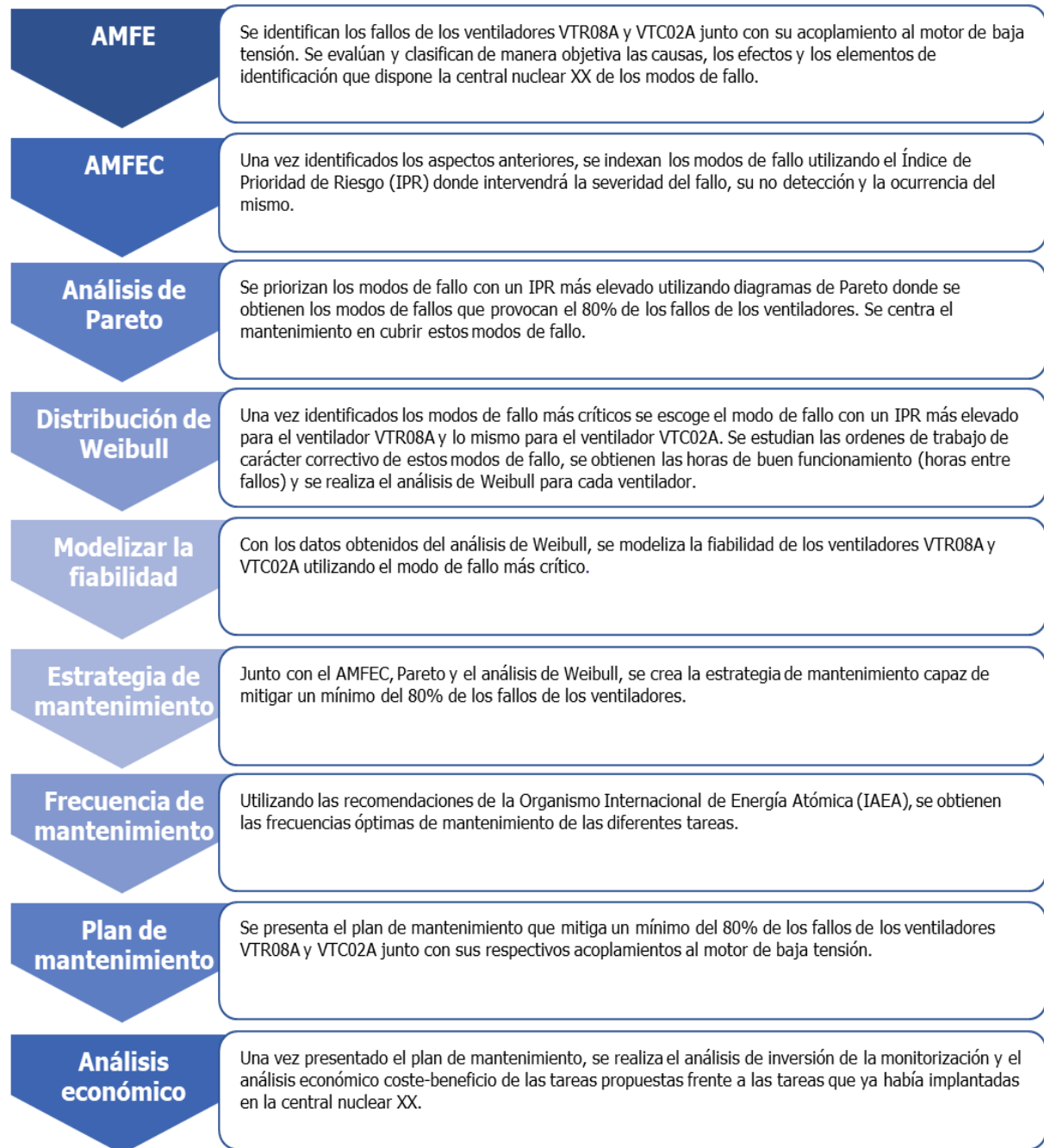
Tabla 9.1. Frecuencia de mantenimiento según la disponibilidad [17].

Disponibilidad requerida	99,5%	97,5%	95%	93%	91%	89%
Frecuencia de mantenimiento (como % del MTBF)	1%	5%	10%	15%	21%	25%

10. DESARROLLO DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN FIABILIDAD DE LOS VENTILADORES VTR08A Y VTC02A

Utilizando los métodos definidos en los apartados anteriores se desarrolla el plan de mantenimiento centrado en la fiabilidad de los ventiladores VTR08A y VTC02A junto con sus acoplamientos al motor de baja tensión asociado.

A continuación, se muestra un flujograma con los pasos seguidos para realizar el plan de mantenimiento.



10.1. Reconocimiento del equipo y del entorno que lo rodea

10.1.1. Ventilador VTR08A

El ventilador VTR08A pertenece al sistema de refrigeración del edificio de contención, concretamente al subsistema de refrigeración de la cavidad del reactor. Es uno de los ventiladores que se encargan de eliminar la carga térmica generada por la vasija del reactor y proteger así la instrumentación y la estructura de esta.

Descripción del VTR08A

- Es de tipo centrífugo
- Mueve un caudal de aire de unos 40000 m³/h.
- Tiene una velocidad de 1500 r.p.m.
- Su acoplamiento al motor es mediante un acoplamiento flexible con un elastómero intermedio entre los cubos que previene pequeñas desalineaciones entre el eje de reductor y el eje del ventilador.
- Dispone de un reductor de velocidad.
- Se alimenta mediante un motor de baja tensión de 400 V.

A continuación, en la figura 10.1, se puede observar un despiece de un ventilador centrífugo similar. Hay que tener en cuenta que el ventilador estudiado en este proyecto dispone de un reductor de velocidad entre el motor y el ventilador.

El despiece se ha obtenido de la página web del distribuidor de ventiladores centrífugos *AEROVENT. Industrial Ventilation Systems* [I].

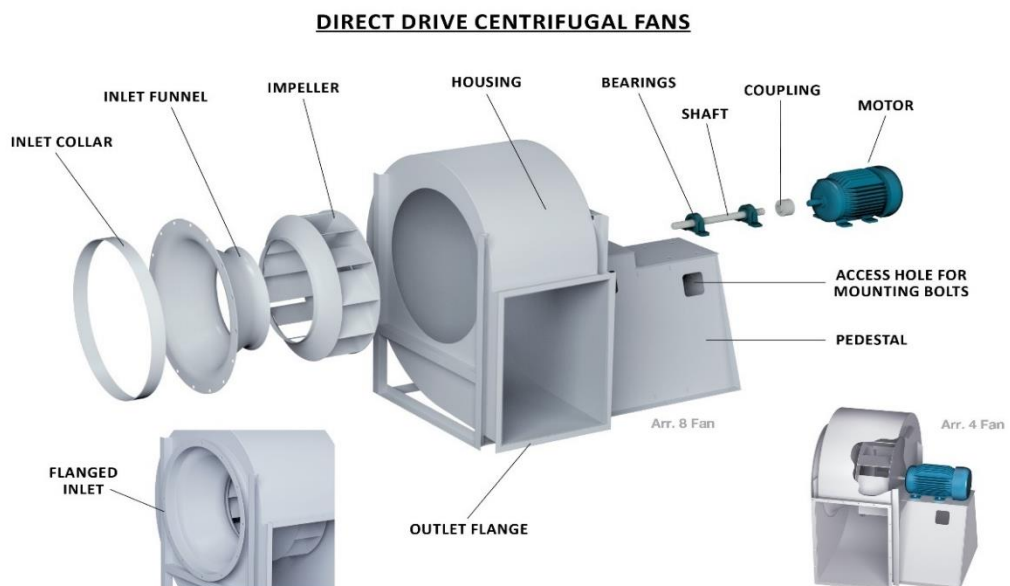


Figura 10.1. Despiece de un ventilador centrífugo conducido por un acoplamiento flexible.

10.1.2. Ventilador VTC02A

Por otra parte, el ventilador VTC02A pertenece al sistema de los generadores diésel de emergencia y tiene como función mantener estos generadores refrigerados en caso de pérdida de suministro de corriente alterna desde el exterior, ya sea por indisponibilidad de las líneas o cualquier otra causa. La central dispone de dos grupos de generadores que funcionan mediante diésel y que permitirían alimentar las barras de salvaguardas en caso de fallo en la alimentación eléctrica.

Descripción del ventilador VTC02A

- Es de tipo centrífugo
- Mueve un caudal de aire de unos 30000 m³/h.
- Tiene una velocidad de 1300 r.p.m.
- Su acoplamiento al motor es mediante poleas y correas
- Se alimenta mediante un motor de baja tensión de 400 V

A continuación, en la figura 10.2, se puede observar un despiece de un ventilador centrífugo similar. El despiece se ha obtenido de la página web del distribuidor de ventiladores centrífugos *AEROVENT. Industrial Ventilation Systems* [I].

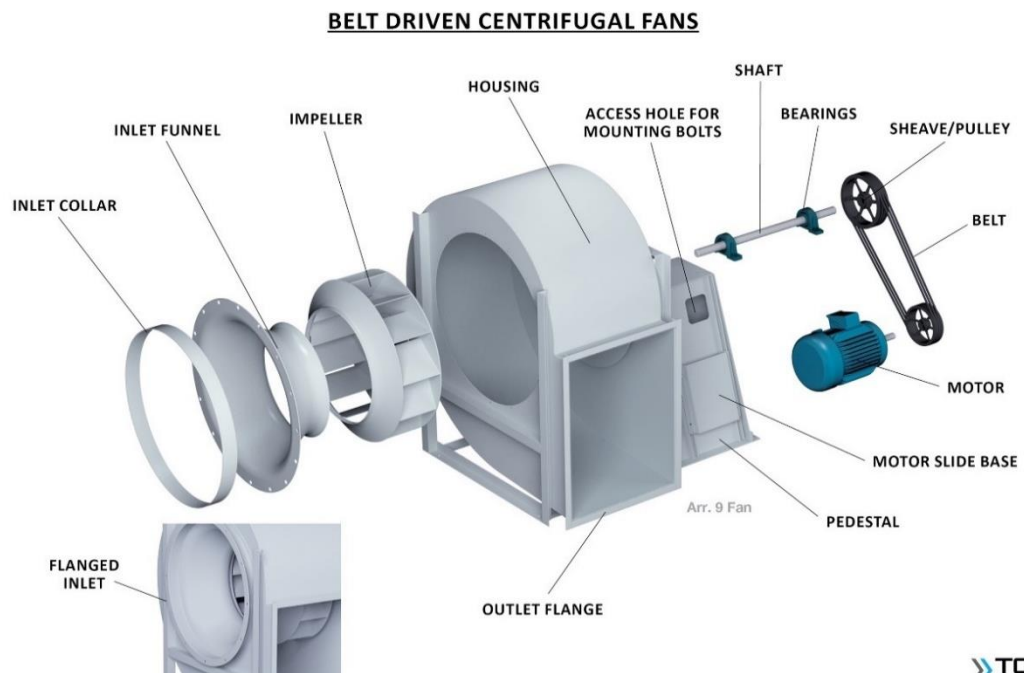


Figura 10.2. Despiece de un ventilador centrífugo conducido por correa y poleas.

10.2. Análisis AMFEC de los ventiladores centrífugos.

Para la realización del análisis AMFEC de los ventiladores VTC02A y VTR08A se seguirá la guía presentada en el apartado 6.1, utilizando solo los puntos de interés ya que alguno de ellos es bastante genérico. Alguno de los puntos no tratados en este apartado se ven expuestos directamente en la tabla final del análisis que se muestra en el apartado 10.3.

10.2.1. Definición de los objetivos y alcance del análisis

Los objetivos de este análisis son la identificación de los modos de fallo y efectos que pueden surgir en los ventiladores VTC02A y VTR08A y poder presentar unas recomendaciones que consigan aumentar la fiabilidad de los equipos y eliminar las tareas de bajo valor. Siempre que sea posible se recomendarán tareas de mantenimiento basadas en condición junto con la respectiva monitorización de estos modos de fallo.

10.2.2. Identificación de los límites y el escenario

A continuación, en la tabla 10.1, se muestra la identificación de los límites y el escenario de aplicación.

Tabla 10.1. Identificación de los límites y el escenario.

Identificación de los límites y el escenario	
Nivel de división	Elementos más relevantes, sin llegar a subdividirlos (Ejes, rodamientos, rodete...)
Límites del análisis	Para VTR08A: Ventilador, acoplamiento, reductor de velocidad. Para VTC02A: Ventilador y sistema de acoplamiento (poleas/correas).
Escenarios	Para VTR08A: Condiciones de operación normales. Condiciones de entorno, ambientales y creadas por elementos y/o activades próximas, favorables. Para VTC02A: Condiciones de operación normales. Condiciones ambientales algo desfavorables debido a la cercanía de la central al mar, con presencia de ciertos agentes agresivos como el cloruro sódico.

10.2.3. Definición de criterios de decisión para el tratamiento de los modos de fallo

Tal y como se observa en el capítulo 3.3.8 del INPO AP-913 Rev.4 [10], se priorizará basándose en la seguridad de la planta, el impacto operativo y la disponibilidad de la estación.

10.2.4. División de los equipos

A continuación, se muestran las divisiones realizadas y propuestas a estudio. La elección de estos componentes se ha basado en datos bibliográficos respecto a los lugares donde suele fallar el equipo y a la experiencia operativa del personal de mantenimiento de la Central Nuclear XX.

Tabla 10.2. División del ventilador VTC02A en sus componentes propuestos a estudio.

División ventilador VTC02A
<ul style="list-style-type: none"> • Rodete • Eje • Rodamientos • Sistema poleas/correas

Tabla 10.3. División del ventilador VTR08A en sus componentes propuestos a estudio.

División ventilador VTR08A	
•	Rodete
•	Eje
•	Rodamientos

Tabla 10.4. División del reductor de velocidad del ventilador VTR08A en sus componentes propuestos a estudio.

División del reductor de velocidad del ventilador VTR08A	
•	Engranajes
•	Rodamientos
•	Sellos

Tabla 10.5. División del acoplamiento flexible del ventilador VTR08A en sus componentes propuestos a estudio.

División del acoplamiento del ventilador VTR08A	
•	Elastómero

10.2.5. Identificación de las funciones de cada componente

En las tablas que se muestran a continuación se indican la funciones que se verían afectadas si fallaran estos compontes.

Tabla 10.6. Función de los componentes propuestos a estudio del ventilador VTC02A.

Función de los componentes del ventilador VTC02A	
Rodete	Impulsar el fluido a través de sus álabes.
Eje	Guiar el movimiento de rotación al ventilador.
Rodamientos	Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el giro.
Sistema poleas/correas	Transmitir velocidad y potencia del motor al ventilador

Tabla 10.7. Función de los componentes propuestos a estudio del ventilador VTR08A.

Función de los componentes del ventilador VTR08A	
Rodete	Impulsar el fluido a través de sus álabes.
Eje	Guiar el movimiento de rotación al ventilador.
Rodamientos	Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el giro.

Tabla 10.8. Función de los componentes propuestos a estudio del acoplamiento del ventilador VTR08A.

Función de los componentes del acoplamiento flexible del ventilador VTR08A	
Elastómero	Compensar la desalineación entre ejes y absorber los golpes del motor o del ventilador.

Tabla 10.9. Función de los componentes propuestos a estudio del reductor del ventilador VTR08A.

Función de los componentes del reductor de velocidad del ventilador VTR08A	
Engranajes	Transmitir potencia mecánica de un componente a otro.
Rodamientos	Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el giro.
Sellos	Retener la contaminación y la fuga de aceite del reductor.

10.2.6. Identificación de los modos de fallo.

A continuación, se muestran los modos de fallo de los componentes mostrados en el apartado 10.2.4. Los modos de fallo estudiados se han basado en datos bibliográficos y experiencia operativa del personal de planta.

También se añadirán sus efectos locales, finales y las causas.

10.2.6.1 Ventilador VTR08A

- **Rodamientos**

Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes [18]

Este modo de fallo se caracteriza por macro o micro cráteres causados por la fusión local, cuando niveles elevados de corriente eléctrica perjudicial pasan a través de los contactos rodantes de un rodamiento. Se produce una eliminación de material de las superficies de contacto [18].

A continuación, en la figura 10.3, se muestra una representación del modo de fallo por erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes.

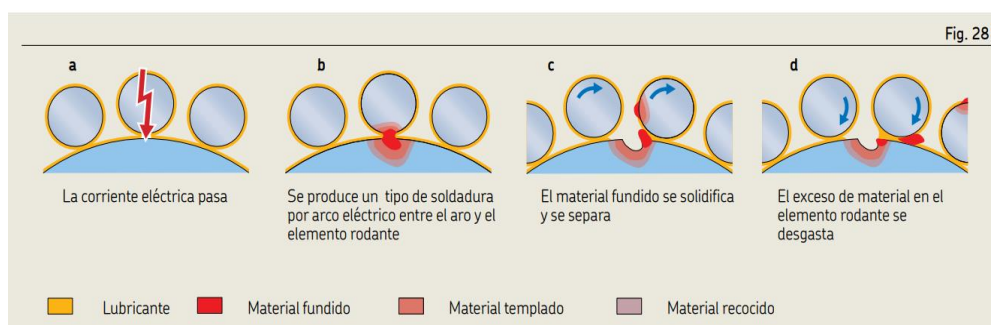


Figura 10.3. Representación del modo de fallo por erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes [19].

Efecto local

Desarrollo de estrías en pista de rodadura y elementos rodantes. Decoloración de gris claro a oscuro, picaduras (erosión) [19], ruido y vibraciones [20], desgaste, aumento de la temperatura y aumento de la fricción.

Efecto final

Aumento de la temperatura, reducción de la velocidad debido a fricción, aumento del ruido y vibraciones.

Causa del modo de fallo

Exceso de corriente, fuga de corriente [18], paso de corriente al soldar (si se realizan soldaduras por arco eléctrico en la cercanía) [21] o puesta a tierra dañada.

** En el caso de ventilador VTC02A, la corriente puede venir por electricidad estática de la correa que puede pasar a través del eje hasta el rodamiento y luego hasta tierra.

Contaminación [22]

Este modo de fallo se caracteriza por muescas en los caminos de rodadura y/o elementos rodantes debido al ingreso y desplazamiento excesivo de contaminantes sólidos o contaminantes líquidos que reducen la viscosidad del lubricante. [19]

Los contaminantes sólidos → picaduras

Los contaminantes líquidos/químicos → corrosión

A continuación, en la figura 10.4, se muestra una representación del efecto local del modo de fallo por contaminación.



Aro exterior de rodamiento de rodillos a rótula
El desgaste abrasivo inicial debido a contaminación se transformó en deformación superficial y descascarillado avanzado

Figura 10.4. Representación del efecto local del modo de fallo por contaminación [19].

Efecto local

Desgaste de los elementos rodantes y la pista de rodadura (picaduras, corrosión...), ruido y vibraciones [22].

Efecto final

Aumento de la temperatura, del ruido y la vibración.

Causa del modo de fallo

Sellos en mal estado, ineficientes u orientación incorrecta [19], herramientas en mal estado o sucias, áreas contaminadas, lubricantes inadecuados o degradados y mal almacenaje [22].

Vibro corrosión [22]

La vibro corrosión es un efecto que se produce en las zonas de contacto entre los elementos rodantes y la pista de rodadura debido a los micro movimientos provocados por vibración externa. Este fenómeno acostumbra a suceder cuando el equipo se encuentra parado ya sea por mantenimiento o cualquier otra razón. La vibración exterior puede hacer que los elementos rodantes se desplacen hacia atrás y hacia adelante por la pista, formando una estría en la misma. Dependiendo de la intensidad de las vibraciones, las condiciones de lubricación y la carga, se produce una combinación de corrosión y desgaste, formando depresiones poco profundas (estrías) en la pista de rodadura. Se distingue de la erosión eléctrica por el hecho de que los elementos rodantes no están marcados [18].

A continuación, en la figura 10.5, se muestra una representación del efecto local del modo de fallo vibro corrosión.

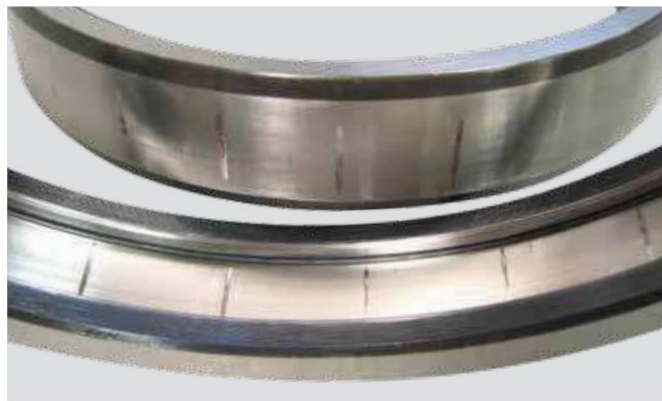


Figura 10.5. Representación del efecto local del modo de fallo por vibro corrosión [19]

Efecto local

Estrizado en los caminos de rodadura [19].

Efecto final

Aumento de ruido del ventilador cuando se encuentra parado [19].

Causa del modo de fallo

Vibraciones externas durante largas paradas. Cuando el rodamiento no gira, no se puede formar una película de lubricante que evite el desgaste de la pista de rodadura. Los restos de desgaste se oxidan y aceleran el proceso de desgaste [22].

Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes [22]

Este modo de fallo se caracteriza por la aparición de descoloramientos en los anillos, bolas y jaulas que pasan a tener un color azul/oro. El sobrecalentamiento hace perder la dureza, se deforman los elementos rodantes y los anillos, y puede degradar el lubricante [22].

A continuación, en la figura 10.6, se muestra una representación del efecto local del modo de fallo por sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes.

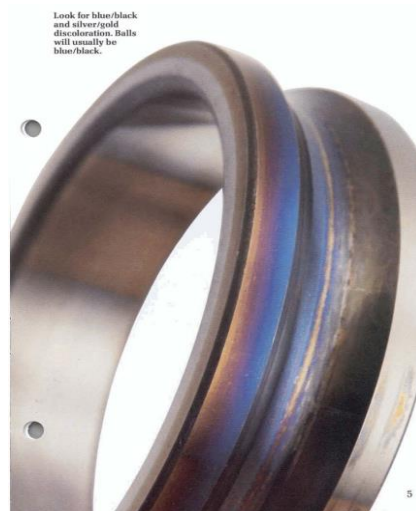


Figura 10.6. Representación del efecto local del modo de fallo por sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes [22].

Efecto local

Degradación del lubricante, decoloración intensa de las piezas del rodamiento, grandes deformaciones plásticas de los caminos de rodadura, elementos rodantes y anillos, posible bloqueo del rodamiento [21] y pérdida de dureza [22].

Efecto final

Aumento de la temperatura.

Causa del modo de fallo

Juego interno en servicio del rodamiento insuficiente, sobre todo en el caso de rodamientos de elevada velocidad de giro, lubricación inadecuada, excesiva o insuficiente, temperaturas de funcionamiento excesivas [21], refrigeración insuficiente [22] carga excesiva o una elevada carga eléctrica [18].

Lubricación [19]

El modo de fallo por lubricación es de los más habituales y tiene como síntomas comunes el descoloramiento azul/marrón de los elementos rodantes y caminos de rodadura. También lo son el desgaste de los elementos rodantes, anillo y jaula que provocará sobrecalentamiento, fatiga, desgaste... [22].

A continuación, en la figura 10.7, se muestra una representación del efecto local del modo de fallo lubricación.

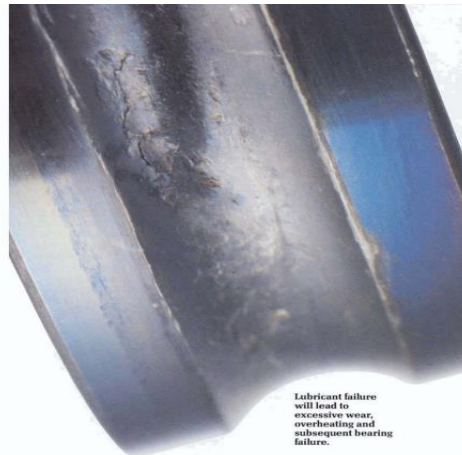


Figura 10.7. Representación del efecto local del modo de fallo por lubricación [22].

Efecto local

Desgaste abrasivo, vibro corrosión, desgaste adhesivo, desgaste por fatiga en caminos de rodadura [18], sobrecalentamiento [22], vibraciones [19] fricción y ruido.

Efecto final

Aumento de la temperatura, de la vibración y el ruido, reducción de la velocidad debido a la fricción.

Causa del modo de fallo

Lubricación inadecuada o insuficiente, temperatura excesiva que degrade el lubricante [22] y sellado dañado [19].

Desalineación entre elementos rodantes y la pista de rodadura [22]

Ocurre al no mantener colinealidad entre equipos. Los esfuerzos provocados generan sobrecarga en el rodamiento llevándolo a una disminución de su vida y fallo prematuro.

A continuación, en la figura 10.8, se muestra una representación del modo de fallo por desalineación entre elementos rodantes y la pista de rodadura.

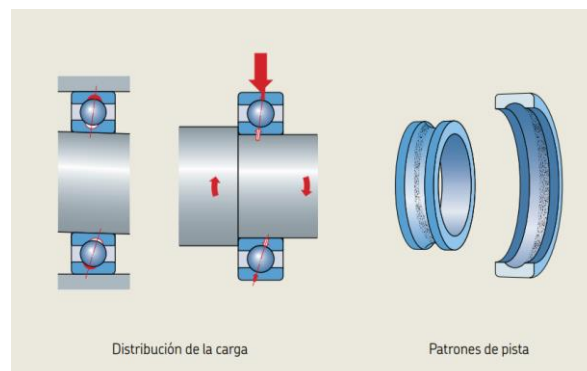


Figura 10.8. Representación del modo de fallo por desalineación entre elementos rodantes y la pista de rodadura [19].

Efecto local

Aumento de la temperatura, del desgaste [22] de la vibración [18] del ruido [19] y de la fricción.

Efecto final

Disminución de la velocidad debido a la fricción [22], aumento de la temperatura, del ruido y de la vibración.

Causa del modo de fallo

Eje doblado, desalineamiento entre eje y acoplamiento, sobrecalentamiento [22], sobrecarga y un mal montaje [18].

• **Eje**

Desalineación eje/acoplamiento [23]

Este modo de fallo se caracteriza por la condición en la que la línea central geométrica de dos ejes acoplados no coincide a lo largo del eje de rotación. Este modo de fallo puede ser el causante de muchos fallos en los componentes que están conectados al eje del ventilador; rodamientos, rodete...

A continuación, en la figura 10.9, se muestra una representación del modo de fallo por desalineación eje/acoplamiento.

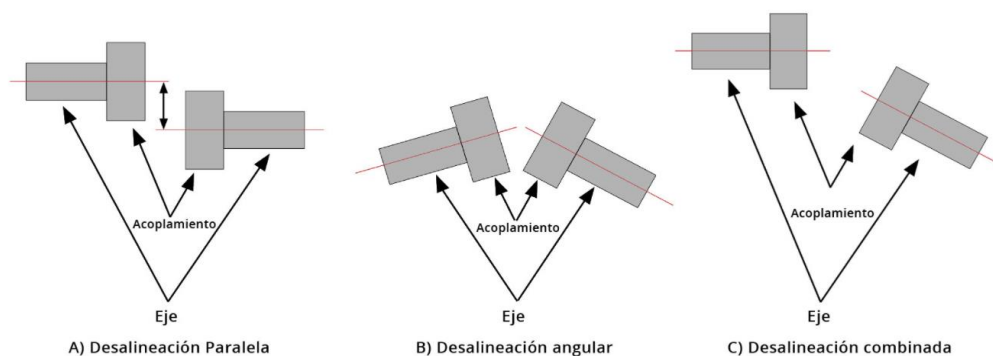


Figura 10.9. Representación del modo de fallo por desalineación eje/acoplamiento.

Efecto local

Aumento de vibraciones [23], fatiga y aumento de la temperatura.

Efecto final

Daño en rodamientos, rodete, anillos, sellos, engranajes y acoplamiento [23]. Reducción de la velocidad debido a fricción y aumento de la vibración, del ruido y de la temperatura.

Causa del modo de fallo

Montaje incorrecto, rodamientos dañados o desgastados, cargas excesivas o desequilibradas [23] y desgaste del acoplamiento.

Desgaste (Abrasivo, adhesivo y corrosivo) [24]

El desgaste por abrasión se produce cuando un determinado material raya o desgasta una superficie más blanda. Se estima que la abrasión es responsable del 50% [24] de los fallos relacionados con el desgaste.

El desgaste adhesivo se produce cuando las proyecciones microscópicas en la interfaz de deslizamiento entre dos piezas que se acoplan se sueldan bajo altas presiones y temperaturas locales. Después de soldar, las fuerzas de deslizamiento arrancan el metal de una superficie. El resultado es una diminuta cavidad en una superficie y un saliente en la otra, que causará más daños. Por lo tanto, el desgaste adhesivo se inicia de forma microscópica, pero progresa de forma macroscópica

La mejor forma de eliminar el desgaste adhesivo es evitar el contacto metal-metal de las superficies de deslizamiento. Esto se consigue mediante una película lubricante o revestimientos adecuados.

El desgaste corrosivo suele producirse en los componentes lubricados. La gestión del aceite lubricante de los equipos rotativos se dirige principalmente a eliminar el agua en el aceite y el desgaste corrosivo asociado a ella [24].

Efecto local

Aumento de vibraciones [23] y de la temperatura [24].

Efecto final

Aumento de la vibración, reducción de la velocidad de rotación debido a fricción y aumento de la temperatura.

Causa del modo de fallo

Rodamientos dañados, lubricación insuficiente, lubricación inadecuada o contaminada [24] ajuste incorrecto (que se pueda llevar parte de material a la hora de introducir el rodamiento en el eje), altas temperaturas y sellos en mal estado.

- **Rodete**

Desgaste de los álabes (Erosión, corrosión...) [24]

El desgaste de los álabes es un modo de fallo común en este tipo de equipos, depende mucho el ambiente de trabajo. En el caso de este ventilador el ambiente de trabajo se considera adecuado, mientras que, para el VTC02A, que succiona aire exterior, se considera que los álabes enfrentan un ambiente agresivo debido la alta humedad y el cloruro sódico.

Efecto local

Ruido [23] y vibración.

Efecto final

Reducción del caudal de salida [23] y aumento del ruido y la vibración.

Causa del modo de fallo

Separación demasiado estrecha entre los álabes y la carcasa, y ambientes contaminados [23].

Roce de álabes y carcasa [25]

Este modo de fallo es muy característico de los ventiladores centrífugos y viene precedido por fallos en los componentes conductores del ventilador, ya sea una desalineación excesiva del eje con el acoplamiento, poleas desalineadas (en caso de ventiladores accionados por poleas/correas), rodamientos en mal estado, entre otros. Este modo de fallo se caracteriza por los daños causados por la fricción de los álabes con la carcasa del ventilador.

Efecto local

Deterioro de álabes y carcasa, aumento de la temperatura, de la vibración y del ruido.

Efecto final

Aumento de la vibración, del ruido y de la temperatura y la reducción de caudal de salida.

Causa del modo de fallo

Desalineación del eje y los rodamientos, desalineación del eje y del reductor, montaje incorrecto y eje en mal estado.

Contaminación del rodete [23]

La contaminación depende mucho del ambiente en el que trabaje el ventilador o la limpieza de este y sus alrededores. Este modo de fallo puede causar la rotura de los álabes si la contaminación es extrema y no se trata o incluso la parada por obstrucción por algún elemento extraño.

Efecto local

Aumento del ruido y de la vibración, y deterioro de los álabes.

Efecto final

Reducción del caudal de salida [23], aumento de la vibración y de la temperatura, y posible obstrucción del rodete.

Causa del modo de fallo

Contaminantes externos [23].

10.2.6.2 Acoplamiento ventilador VTR08A

- **Elastómero**

Desgaste del elastómero [23]

Este modo de fallo acostumbra a aparecer por ataques químicos ya sea por líquidos o aceites, temperaturas extremas, desalineamiento entre el del ventilador y el eje del reductor, entre otros. El desgaste provoca que la separación entre los cubos de acoplamiento se reduzca, provocando en casos extremos el roce entre los cubos e incluso chispas debido a la fricción.

A continuación, en la figura 10.10 se muestra una representación del espesor del elastómero y la separación entre cubos de acoplamiento.

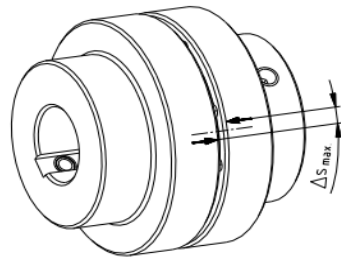


Figura 38: Comprobación del límite de desgaste

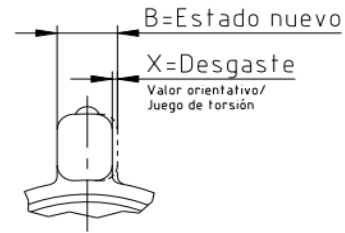


Figura 39: Desgaste del anillo de elastómero

Figura 10.10. representación de espesor del elastómero y la separación entre cubos de acoplamiento. [26]

Efecto local

Aumento del ruido, de vibraciones y de la temperatura.

Efecto final

Desgaste de los cubos metálicos [26], aumento de vibraciones, del ruido y de la temperatura y deterioro de componentes principales.

Causa del modo de fallo

Desalineamiento excesivo, ataque químico (líquidos, aceites...) [23] y temperaturas muy altas o bajas que causen alteración física del elastómero [26].

10.2.6.3 Reductor ventilador VTR08A

El reductor de velocidad del ventilador VTR08A es similar al que se muestra en la figura 10.11, donde se observa que dispone principalmente de engranajes, rodamientos y sellos flexibles de caucho fluorado con un muelle toroidal de acero inoxidable, tal y como se muestra a la derecha de la figura 10.11.

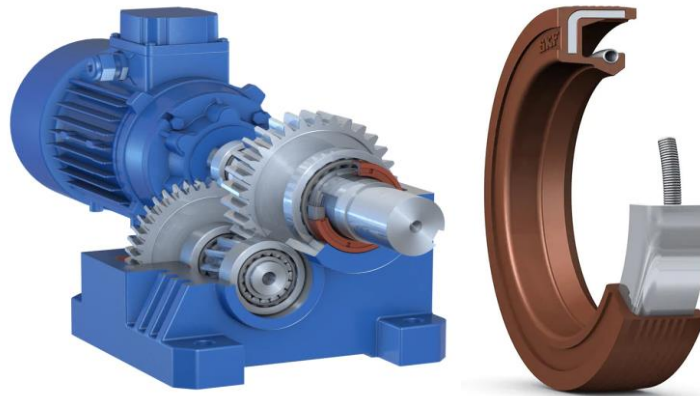


Figura 10.11. Reductor de velocidad junto a su tipo de sello equiparable al del ventilador VTR08A [27]

- **Engranajes**

Lubricación [24]

Una lubricación adecuada es esencial. El lubricante tiene dos funciones principales: minimizar el rozamiento y evacuar el calor. Si el espesor de la película lubricante es

adecuado y el lubricante está limpio, el desgaste será mínimo. El lubricante debe proporcionar protección contra la corrosión.

Algunas aplicaciones requieren lubricantes con muchos aditivos para que este pueda realizar adecuadamente sus tareas. A veces, el propio lubricante falla ya que sus compuestos químicos internos pueden descomponerse con el tiempo, con el calor o por reacciones imprevistas con productos químicos de su entorno. Varios tipos de fallos de los engranajes se deben a un fallo del lubricante [24].

A continuación, en la figura 10.12, se muestra una representación del efecto local del modo de fallo lubricación en engranajes.

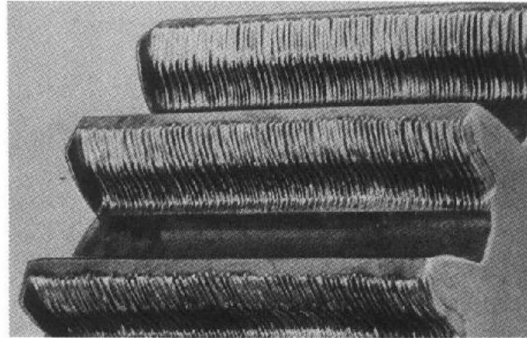


Figure 3-115. Abrasive Wear (Extreme Case). A large portion of the tooth thickness has been worn away due to an accumulation of abrasive particles in the lube-oil supply. Note the deep ridges and the end of the gear teeth that were not subjected to the abrasive action.

Figura 10.12. Representación del efecto local del modo de fallo por lubricación en engranajes [24]

Efecto local

Desgaste (adhesivo y abrasivo), corrosión, rayado, aumento de la temperatura y la fricción [24] aumento de la vibración y del ruido.

Efecto final

Aumento de la temperatura, aumento de la vibración y el ruido [24], reducción de la velocidad de transmisión debido a fricción.

Causa del modo de fallo

Lubricación inadecuada, contaminada, insuficiente o excesiva, temperaturas que degraden el lubricante, lubricación contaminada (agua, ácido...) y sellos en mal estado [24].

Erosión eléctrica en zona dentada [28]

Este fallo se asocia al daño que reciben los flancos de los dientes activos por descargas eléctricas a través de la película de lubricante, se manifiesta como una superficie picada. La causa de esta falla está dada porque la corriente eléctrica alcanza el mecanismo de engranajes, es muy parecida al modo de fallo por erosión eléctrica en la pista de rodadura y elementos rodantes de los rodamientos. Estos dos modos de fallo suelen tener la misma causa raíz.

Efecto local

Ruido, vibraciones, aumento de la temperatura y de la fricción, desgaste y picaduras (erosión).

Efecto final

Aumento de la temperatura, reducción de la velocidad debido a fricción, aumento de vibración y el ruido.

Causa del modo de fallo

Exceso de corriente, fuga de corriente [28] y puesta a tierra dañada.

- **Rodamientos**

Los modos de fallo tratados en los rodamientos del reductor de velocidad son equivalentes a los presentados en el apartado 10.2.5.2 para los rodamientos de VTR08A.

- **Sellos**

Desgaste [23]

Efecto local

El efecto local es el propio desgaste del sello.

Efecto final

Fuga de aceite [23], aumento de la temperatura aumento del ruido y vibración, reducción de la velocidad debido a fricción y degradación de elementos internos del reductor.

Causa del modo de fallo

Corrosión (ataque químico) [24], error de diseño, error de montaje, temperaturas elevadas que degradan el material, contaminantes y desalineamiento del eje [23].

10.2.6.4 Ventilador VTC02A

- **Rodamientos**

Los modos de fallo tratados en rodamientos del ventilador VTC02A son equivalentes a los presentados en el apartado 10.2.6.1. para los rodamientos de VTR08A.

- **Eje**

Los modos de fallo tratados en el eje del ventilador VTC02A son equivalentes a los presentados en el apartado 10.2.6.1 para el eje de VTR08A. A diferencia de que el modo de fallo por desalineación eje/acoplamiento se elimina debido a que este ventilador se acciona mediante el sistema poleas/correas.

- **Rodete**

Los modos de fallo tratados del rodete del ventilador VTC02A son equivalentes a los presentados en el apartado 10.2.6.1. para el rodete de VTR08A.

- **Sistema/polea correa**

Tensión de la correa inadecuada [23]

La tensión inadecuada de la correa ya sea por sobre tensión o lo opuesto, es el modo de fallo más común para este componente y puede llegar incluso a provocar su rotura. Hay una tensión a la que la correa experimenta una vida útil óptima [23].

Efecto local

Desgaste de la polea y la correa, aumento de la temperatura, deslizamiento de la correa, fatiga de la correa (cuando la tensión es excesiva), endurecimiento de la correa (debido al aumento de la temperatura) [23] y ruido.

Efecto final

Variación de la relación de transmisión, reducción de la potencia de transmisión [23], y desalineamiento de las poleas (cuando la tensión es excesiva) [24] y aumento del ruido.

Causa del modo de fallo

Error de instalación [23].

Desalineamiento entre poleas [24]

El desalineamiento entre poleas es otro de los modos de fallo más comunes a la hora de garantizar la integridad de las correas y el correcto funcionamiento del ventilador. Esto se debe principalmente a sobre tensado, que el eje del ventilador deja de estar en paralelo con el eje del motor o que dejan de estar alineados.

A continuación, en la figura 10.13 se muestra una representación del modo de fallo por desalineamiento entre poleas.

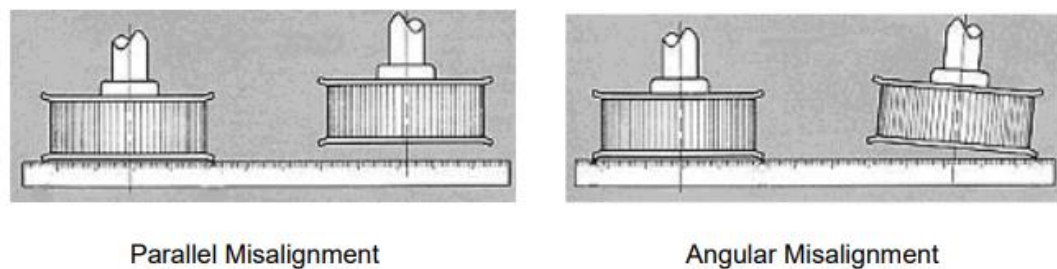


Figura 10.13. Representación del modo de fallo por desalineamiento entre poleas [23].

Efecto local

Desgaste de la correa, aumento de la temperatura [24], aumento de la vibración [29] y del ruido.

Efecto final

Reducción de la potencia de transmisión y aumento del ruido y de la vibración.

Causa del modo de fallo

Sobretensión de la correa y ejes no paralelos [24].

10.2.7. Identificación de los métodos de detección y los controles existentes

Como se ha comentado anteriormente, el mantenimiento que dispone principalmente la central es de un mantenimiento preventivo sistemático, donde se actúa por periodos naturales, independientemente del estado en el que se encuentra el equipo o sus componentes.

A continuación, en la tabla 10.10, se muestra el mantenimiento actual en la Central Nuclear XX para el sistema VTR08A. El sistema del ventilador VTR08A incluye el ventilador, el acoplamiento y el reductor. Cabe destacar que el mantenimiento de este

ventilador, al ubicarse dentro del edificio de contención, se realiza en recarga, es decir, cuando la planta se encuentra parada por recargar de combustible al reactor.

Para el reductor tan solo se hace un análisis de aceite y a partir de este se sacan conclusiones sobre si hace falta o no realizar alguna tarea de mantenimiento adicional.

Tabla 10.10. Mantenimiento actual en la Central Nuclear XX para el sistema VTR08A.

Tipo	Descripción*	Frecuencia
Revisión general**	<ul style="list-style-type: none"> Desmontar le ventilador. Inspección visual. Comprobar el correcto estado del rodete y la correcta fijación al eje junto con limpieza. Limpieza e inspección del estado del rodamiento. Girar manualmente el rodete para comprobar que lo hace suavemente y sin rozar con la carcasa. Engrase de rodamientos. Comprobar alineación eje/acoplamiento. Análisis de aceite del reductor 	1 RE***
Pruebas de operación	<ul style="list-style-type: none"> Medir caudal, presión, vibración y velocidad de giro. Medir temperatura de aire de entrada y salida. 	1 RE (después de revisión general)
Revisiones eléctricas	<ul style="list-style-type: none"> Pruebas de aislamiento de devanados del motor. Comprobación del buen estado de la puesta a tierra. 	1 RE
Sustitución	<ul style="list-style-type: none"> Sustitución de rodamientos del ventilador Sustitución de rodamientos del reductor 	1 RE

*En la descripción del mantenimiento, solo aparece la parte interesada de la tarea.

**La revisión general se caracteriza por que se tiene que parar y abrir el equipo, es la revisión más exhaustiva.

***1 RE = 18 meses.

A continuación, en la tabla 10.11, se muestra el mantenimiento actual en la Central Nuclear XX para el ventilador VTC02A.

Figura 10.11. Mantenimiento actual en la Central Nuclear XX para el ventilador VTC02A

Tipo	Descripción**	Frecuencia
Revisión parcial*	<ul style="list-style-type: none"> Comprobar que las correas se encuentran en buen estado. Comprobar visualmente la tensión de las correas. Comprobar el estado de las poleas del ventilador y del motor. Observar el estado de los álabes del rodete. Limpiar álabes. 	18 M

Tipo	Descripción**	Frecuencia
	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar señales de fuga de grasa. • Comprobar el correcto estado de los rodamientos y ruidos extraños haciéndolos girar manualmente. • Limpiar engrasadores. • Engrasar rodamientos. 	
Pruebas de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Medir caudal presión, vibración y presión. 	18 M
Rondas de operador	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar fugas, ruidos o vibraciones anormales. 	1 T
Revisiones eléctricas	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas de aislamiento de devanados del motor. • Comprobación del buen estado de la puesta a tierra. 	1 RE

*La revisión parcial se caracteriza por que el equipo está parado, pero no se tiene que abrir.

**En la descripción del mantenimiento, solo aparece la parte interesada de la tarea.

10.2.7.1 Evaluación de la importancia relativa de los modos de fallo.

Para la realización de las tablas con los índices de severidad y no detección se ha basado en el documento presentado por la comisión europea sobre la realización de un AMFEC [30].

Para el índice de ocurrencia se ha tenido en cuenta la experiencia del personal de mantenimiento de la central, utilizando históricos de órdenes de trabajo de carácter correctivo realizadas en los últimos 20 años de operación de la central. Para los modos de fallo que no se han encontrado datos relevantes, se ha utilizado el documento de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) [5] de sus siglas en inglés, para obtener la tasa de falla típica para estos modos de fallo.

A continuación, en la tabla 10.12 se muestran los índices de severidad utilizados en el AMFEC realizado en este proyecto.

Tabla 10.12. Índices de severidad utilizados en el AMFEC [30].

Valoración	Severidad del modo de fallo	Efecto
1	No afecta.	
2	Efecto imperceptible para el equipo (se encuentra dentro de los límites).	Sin efectos
3	Afecta a los sentidos de los operarios (ruido, vibraciones...) < 25%.	Molesto
4	Afecta a los sentidos de los operarios (ruido, vibraciones...) > 25%.	
5	Degradación de una función secundaria (equipo opera, pero algún componente de nivel inferior, con rendimiento reducido).	Pérdida o degradación de una función secundaria
6	Perdida de una función secundaria (equipo opera, pero algún componente de nivel inferior no opera).	
7	Degradación de la función principal (equipo opera, con rendimiento reducido).	

Valoración	Severidad del modo de fallo	Efecto
8	Pérdida de la función principal (equipo no opera, pero no afecta a la seguridad).	Pérdida o degradación de una función principal
9	Afecta a la seguridad y/o no cumple con la normativa (hay indicadores para su detección).	Peligroso, pero con aviso
10	Afecta a la seguridad y/o no cumple con la normativa (no hay ningún indicador para su detección).	Peligroso sin aviso

A continuación, en la tabla 10.13 se muestran los índices de ocurrencia utilizados en el AMFEC realizado en este proyecto.

Tabla 10.13. Índices de ocurrencia utilizados en el AMFEC [5].

Número de fallos	Años de estudio**	Ocurrencia (Tasa de fallos*)	Valoración del índice
0 - 1	20	0,0 - 0,1	1
1 - 3		0,1 - 0,2	2
3 - 6		0,2 - 0,3	3
6 - 10		0,3 - 0,5	4
10 - 15		0,5 - 0,8	5
15 - 20		0,8 - 1,0	6
20 - 25		1,0 - 1,3	7
25 - 30		1,3 - 1,5	8
30 - 35		1,5 - 1,8	9
> 35		>1,8	10

*La tasa de fallo equivale al número de fallos ocurridos dividido por el periodo de años analizado.

**En el análisis no se tienen en cuenta los recambios, se analiza suponiendo 20 años de funcionamiento.

A continuación, en la tabla 10.14 se muestran los índices de no detección utilizados en el AMFEC realizado en este proyecto.

Tabla 10.14. Índices de no de detección utilizados en el AMFEC [30].

Valoración	No detección
1	El modo de fallo no puede suceder porque se ha diseñado para prevenirlo.
2	Detección mediante monitorización 100 %.
3	Detección mediante monitorización 100 - 50 %.
4	Detección mediante monitorización < 50 %.
5	Se detecta mediante rondas de operador
6	Es posible detectarlo mediante rondas de operador
7	Existen tareas de mantenimiento preventivo (no se puede detectar o es muy poco probable que se identifique mediante rondas de operador)
8	La detección solo puede ser a posteriori (una vez haya sucedido).
9	No se puede detectar fácilmente (fallos aleatorios).
10	No se puede detectar o no se analiza.

10.2.7.2 Identificación de acciones

A continuación, se muestran las acciones recomendadas para eliminar el modo de fallo, reducir la probabilidad de ocurrencia, eliminar o reducir sus efectos y/o la reducción del índice de no detección.

Tabla 10.15. Posibles acciones propuestas para los modos de fallo del ventilador VTR08A.

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
Ventilador VTR08A	Rodamientos	Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de la vibración (local). • Prueba de aislamiento, fuga de corriente y puesta a tierra (motor) [18]. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante [19]. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la vibración (local). • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas y temperatura anormal (en sala de control). • Inspección de sellos junto con limpieza y descontaminación del área de trabajo [22]. • Múltiples sellos (cambio de diseño) [19].
		Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliar el juego interno (cambio de diseño) [21]. • Análisis de lubricante [21]. • Control de sobrecarga [22]. • Inspección en busca de descoloramientos en anillos, elementos rodantes y jaulas, deformaciones... • Monitorización de control de nivel de lubricación. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final) [19]. • Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación). • Prueba de aislamiento, fugas de corriente y puesta a tierra (motor) • Refrigeración suplementaria (cambio de diseño) [22]. • Rondas de operador en busca de una temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada.
		Lubricación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante [19]. • Inspección de fugas de lubricante [19].

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
			<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del estado de los sellos, decoloraciones y desgaste de la pista de rodadura y elementos rodantes. • Monitorización de la temperatura (local) [19]. • Monitorización de la velocidad de rotación (final) [19]. • Monitorización del nivel lubricante [19]. • Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación). • Monitorización de la vibración (local). • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Desalineamiento entre elementos rodantes y la pista de rodadura	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobación de la alineación del eje y el acoplamiento. • Inspección en busca de desgaste en los caminos de rodadura y elementos rodantes. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de la vibración (local). • Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación). • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Vibro corrosión en la pista de rodadura	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores de vibración (cambio de diseño) [19]. • Girar los equipos parados a intervalos regulares [19]. • Lubricación con propiedades de antivibrocorrosión (cambio de diseño) [19].
	Eje	Desalineamiento eje/acoplamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Guías de procedimiento de montaje y doble comprobación del montaje. • Inspección del acoplamiento. • Inspección de rodamientos. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad (local). • Monitorización de la vibración. • Pruebas de alineación eje/acoplamiento. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
		Desgaste (adhesivo, abrasivo y corrosivo)	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante. • Comprobación del correcto ajuste (si se desea cambiar el rodamiento). • Ensayos no destructivos (inspección por líquidos penetrantes) [31]. • Inspección de rodamientos [24]. • Inspección visual del eje [31]. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad (local). • Monitorización de la vibración. • Monitorización de nivel de lubricación. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
	Rodete	Desgaste de los álabes (Erosión, corrosión...)	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos no destructivos en los álabes (inspección por líquidos penetrantes). • Inspección del correcto estado de los álabes. • Monitorización de la velocidad de rotación (local). • Monitorización de la vibración. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Roce entre álabes y carcasa	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del correcto estado de los álabes. • Monitorización de la de vibración. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (local). • Procedimientos de montaje con doble revisión. • Pruebas de alineación y comprobar correcto estado del eje. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Contaminación del rodete	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar el correcto estado de los álabes y su limpieza. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (local). • Monitorización de la vibración.

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
			<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="1099 272 2170 335">• Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).

Tabla 10.16. Posibles acciones propuestas para los modos de fallo del reductor del ventilador VTR08A.

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
Reductor de velocidad del ventilador VTR08A	Engranajes	Lubricación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de la lubricación (aceite). • Ensayos no destructivos (inspección por líquidos penetrantes). • Inspección de sellos junto con limpieza y descontaminación del área de trabajo. • Monitorización de la temperatura (local) [23]. • Monitorización de la velocidad de rotación. • Monitorización de nivel lubricación (aceite). • Monitorización de vibración (local) [23]. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Erosión eléctrica en la zona dentada	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización de la vibración (local). • Prueba de aislamiento, fuga de corriente y puesta a tierra (motor). • Monitorización de la temperatura (local). • Ensayos no destructivos (inspección por líquidos penetrantes). • Monitorización de la velocidad de rotación. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control). • Análisis de la lubricación (aceite).
	Rodamientos	Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del estado de los rodamientos. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de la vibración (local). • Prueba de aislamiento, fugas de corriente y puesta a tierra (Motor) [18]. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante (aceite) [19]. • Inspección de sellos junto con limpieza, descontaminación del área de trabajo [22]. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la vibración (local).

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
			<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples sellos (cambio de diseño) [19]. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas y temperatura anormal (en sala de control).
		Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliar el juego interno (cambio de diseño) [21]. • Análisis de lubricante (aceite) [21]. • Control de sobrecarga. • Inspección en busca de decoloramientos en anillos, elementos rodantes y jaulas, deformaciones... [22]. • Monitorización de control de nivel de lubricación. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final) [19]. • Prueba de aislamiento, fugas de corriente y puesta a tierra (motor). • Refrigeración suplementaria (cambio de diseño) [22]. • Rondas de operador en busca de una temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Lubricación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante (aceite) [19]. • Inspección de fugas de lubricante [19]. • Inspección del estado de los sellos, decoloraciones y desgaste de la pista de rodadura y elementos rodantes. • Inspección en busca de fugas. • Monitorización de la temperatura (local) [19]. • Monitorización de la velocidad de rotación (final) [19]. • Monitorización del nivel lubricante [19]. • Monitorización de la vibración (local). • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Desalineamiento entre elementos rodantes y la pista de rodadura	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobación de la alineación del eje y el acoplamiento. • Inspección en busca de desgaste en los caminos de rodadura y elementos rodantes. • Monitorización de la temperatura (local).

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
			<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de la vibración (local). • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y velocidad de rotación inadecuada (en sala de control).
		Vibro corrosión en la pista de rodadura	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores de vibración (cambio de diseño) [19]. • Girar los equipos parados a intervalos regulares [19]. • Lubricación con propiedades de antivibrocorrosión (cambio de diseño) [19].
	Sellos	Desgaste	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección de sellos junto con limpieza, descontaminación del área de trabajo...). • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de la vibración. • Pruebas de alineación eje/reductor. • Rondas de operador en de vibraciones extrañas (en sala de control). • Análisis de lubricación (aceite).

Tabla 10.17. Posibles acciones propuestas para los modos de fallo del reductor del ventilador VTR08A.

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
Acoplamiento flexible ventilador VTR08A	Elastómero	Desgaste del elastómero	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del acoplamiento (p.e. revisar grosor entre cubos, desmontar, limpiar) [26]. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la vibración. • Pruebas de alineación eje/reductor [26]. • Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas y una temperatura anormal.

Tabla 10.18. Posibles acciones propuestas para los modos de fallo ventilador VTC02A.

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
Ventilador VTC02A	Rodamiento	Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la vibración (local). • Prueba de aislamiento, fugas y puesta a tierra (motor) [18]. • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas. • Prueba de aislamiento, fuga de corriente y puesta a tierra (motor).
		Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante [19]. • Inspección de sellos junto con limpieza y descontaminación del área de trabajo [22]. • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la vibración (local). • Múltiples sellos (cambio de diseño) [19]. • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas.
		Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliar el juego interno (Cambio de diseño) [21]. • Análisis de lubricante [21]. • Control de sobrecarga [22]. • Inspección en busca de descoloramientos en anillos, elementos rodantes y jaulas, deformaciones... • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de nivel lubricante. • Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación). • Refrigeración suplementaria (cambio de diseño) [22]. • Prueba de aislamiento, fugas de corriente y puesta a tierra (motor). • Rondas de operación en busca de ruidos y vibraciones extrañas.
		Lubricación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante [19]. • Inspección del estado de los sellos, decoloraciones y desgaste de pista de rodadura y elementos rodantes ...). • Monitorización de la temperatura (local) [19]. • Monitorización de la velocidad de rotación (final) [19].

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
			<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización de la vibración (local). • Monitorización de nivel de lubricante [19]. • Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación). • Rondas de operador en busca de fugas, ruidos y vibraciones extrañas. • Inspección de fugas de lubricante [19].
		Desalineamiento entre elementos rodantes y la pista de rodadura	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobación del paralelismo de los ejes (ventilador/motor). • Inspección en busca de desgaste en los caminos de rodadura y elementos rodantes • Monitorización de la temperatura (local). • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de la vibración (local). • Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación). • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas.
		Vibro corrosión en la pista de rodadura	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores de vibración (cambio de diseño) [19]. • Girar los equipos parados a intervalos regulares [19]. • Lubricación con propiedades de antivibrocorrosión (cambio de diseño) [19]. •
	Eje	Desgaste (adhesivo, abrasivo y corrosivo)	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de lubricante • Comprobación del correc.to ajuste (si se desea cambiar el rodamiento). • Ensayos no destructivos (p.e. inspección por líquidos penetrantes) [31]. • Inspección de rodamientos [24]. • Inspección visual del eje [31]. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de nivel de lubricación. • Monitorización de la velocidad (local). • Monitorización de la vibración. • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas. •
	Rodete	Desgaste de los álabes (Erosión, corrosión...)	<ul style="list-style-type: none"> • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas. • Inspección del correcto estado de los álabes. • Ensayos nos destructivos en los álabes (p.e. inspección por líquidos penetrantes).

Equipo	Componente	Modo de fallo	Posibles acciones (de mantenimiento preventivo y monitorización)
			<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización de la vibración. • Monitorización de la velocidad de rotación (local).
		Roce entre álabes y carcasa	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del correcto estado de los álabes. • Monitorización de vibración (local). • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (local). • Procedimientos de montaje con doble revisión. • Pruebas de alineación y comprobar correcto estado del eje. • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas.
		Contaminación del rodete	<ul style="list-style-type: none"> • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas. • Monitorización de la vibración (local). • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (local). • Comprobar el correcto estado de los álabes y su limpieza.
	Sistema correas/poleas	Tensión de la correa inadecuada	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del correcto estado del sistema de transmisión por correa. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (final) • Monitorización de vibraciones. • Monitorización del alineamiento de las poleas [29]. • Comprobar el tensado de la correa. • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas.
		Desalineamiento entre poleas	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeccionar el correcto estado del sistema de transmisión por correa. • Monitorización de la temperatura. • Monitorización de la velocidad de rotación (final). • Monitorización de vibraciones. • Monitorización del alineamiento de las poleas [29]. • Comprobar el tensado de la correa. • Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas.

10.3. Tabla final AMFEC ventilador VTC02A, reductor VTR08A, acoplamiento VTR08A y ventilador VTR08A

Con todas las acciones propuestas mostradas en las tablas 10.15, 10.16, 10.17 y 10.18 para mitigar los modos de fallo del sistema VTR08A (ventilador VTR08A, reductor VTR08A y acoplamiento VTR08A) y el ventilador VTC02A, y con la ayuda del diagrama de Pareto, se utilizarán las acciones de prevención o monitorización de los modos de fallo más relevantes para crear el plan de mantenimiento.

A continuación, se muestran las tablas resultantes del análisis modal de fallos, efectos y su criticidad de los equipos estudiados en este proyecto.

AMFEC ventilador VTR08A

Equipo	Función del equipo	Componente	Función componente	Fallo				Índices actuales				Posibles acciones (PM y de monitorización)	Plan de mantenimiento	
				Modo	Efecto (local)	Efecto (final)	Causa	Controles actuales (tareas)	Severidad	Ocurrencia	No detección			IPR
Ventilador centrífugo VTR08A	Refrigerar la cavidad del reactor. Mover un caudal de aire de 40000 m3/h a una velocidad de 1500 rpm	Rodamientos	Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el giro	Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	Ruido	Aumento de la temperatura	Exceso de corriente	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y puesta a tierra (IRE) RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE) PO: Medición de velocidad de rotación y vibraciones (IRE)	3	2	7	42	Monitorización de la temperatura (local)	
					Aumento de la fricción	Reducción de la velocidad debido a fricción	Fuga de corriente							
					Aumento de la temperatura	Aumento del ruido y la vibración	Puesta a tierra dañada							
					Decoloración (gris claro a gris oscuro)		Paso de corriente al soldar (soldadura por arco eléctrico cerca del ventilador)							
					Desgaste									
					Estriado									
		Picaduras (erosión)												
		Vibración												
		Contaminación		Vibración	Aumento de la temperatura	Áreas de trabajo contaminadas	RG: Limpieza e inspección del estado de los rodamientos (IRE)	5	4	7	140	Análisis de lubricante		
				Desgaste	Aumento del ruido y la vibración	Lubricantes inadecuados o degradados	PO: Medición de vibraciones (IRE)							
				Ruido		Sellado en mal estado o mal instalado (p.e sellos mal orientados)								
				Picaduras		Mal almacenaje								
		Corrosión			Herramientas de trabajo en mal estado									
		Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes		Pérdida de dureza	Aumento de la temperatura	Elevada carga eléctrica	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y puesta a tierra (IRE)	3	4	7	84	Ampliar el juego interno (cambio de diseño)		
				Deformación elementos rodantes		Carga excesiva	RG: Engrase de rodamientos (IRE)							
				Deformación anillos		Refrigeración insuficiente	RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE)							
				Degradación del lubricante		Lubricación inadecuada, excesiva o insuficiente								
		Decoloración intensa			Temperaturas de funcionamiento excesivas	Juego interno insuficiente								
Lubricación	Aumento de la temperatura	Aumento de la temperatura	Lubricación inadecuada o insuficiente.	RG: Engrase de rodamientos (IRE)	5	4	7	140	Análisis de lubricante					
	Ruido	Aumento del ruido y la vibración	Temperatura excesiva que degrada el lubricante	RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE)										
	Fatiga	Reducción de la velocidad debido a fricción	Sellos en mal estado	PO: Medición de velocidad de rotación y vibraciones (IRE)										
	Vibración													
	Aumento de la fricción													
	Desgaste (abrasivo, vibro corrosivo, adhesivo)													
Desalineación entre los elementos rodantes y la pista de rodadura	Ruido	Aumento de la temperatura	Desalineamiento del eje y el acoplamiento	RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE)	5	3	7	105	Comprobación de la alineación del eje y el acoplamiento					
	Vibración	Reducción de la velocidad debido a fricción	Eje doblado	RG: Inspección visual del eje (IRE)										
	Aumento de la fricción	Aumento del ruido y la vibración	Sobrecalentamiento	PO: Medición de velocidad de rotación y vibraciones (IRE)										
	Aumento de la temperatura		Instalación incorrecta	RG: Comprobación de la alineación eje/reductor (IRE)										
Desgaste		Sobrecarga												
Vibrocorrosión en la pista de rodadura	Estriado en los caminos de rodadura	Ruido en el ventilador que se encuentra parado	Vibraciones externas durante largas paradas	RG: Girar rodete a mano cuando se está realizando la revisión general (IRE)	3	2	7	42	Amortiguadores de vibración (cambio de diseño)					
				RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE)										
Desalineación eje/acoplamiento	Vibración	Aumento de la temperatura	Montaje incorrecto	RG: Inspección visual del eje (IRE)	7	3	7	147	Guías de procedimiento de montaje y doble comprobación del montaje					
	Fatiga	Aumento del ruido y la vibración	Rodamientos dañados/desgastados	RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE)										
	Aumento de la temperatura	Reducción de velocidad debido a fricción	Carga excesiva o desequilibrada	RG: Comprobación de la alineación eje/reductor (IRE)										
Aumento de la fricción	Daño en el rodete del ventilador	Desgaste del elastómero del acoplamiento	PO: Medición de la velocidad de rotación y vibraciones (IRE)											
Daño en rodamientos														
	Daño en anillos y sellos													
	Daño en el reductor													
	Daño en el acoplamiento													
Desgaste (adhesivo y abrasivo) y corrosión	Vibración	Aumento de la vibración	Lubricación insuficiente	PO: Medición de la velocidad de rotación y vibraciones (IRE)	3	2	7	42	Análisis de lubricante					
	Aumento de la fricción	Reducción de velocidad debido a fricción	Lubricación inadecuada/contaminada	RG: Engrase de rodamientos (IRE)										
	Aumento de la temperatura	Aumento de la temperatura	Altas temperaturas	RG: Inspección visual del eje (IRE)										
			Rodamientos dañados/desgastados	RG: Inspección del estado de los rodamientos (IRE)										
Ajuste de rodamiento incorrecto		Sellos en mal estado												
Desgaste los álabes (Erosión, corrosión...)	Ruido	Reducción del caudal de salida	Ambientes contaminados	RG: Comprobación del correcto estado del rodete y los álabes (IRE)	7	2	7	98	Ensayos no destructivos en los álabes (inspe. LP)					
	Vibración	Aumento del ruido y la vibración	Roce entre álabes y carcasa	PO: Medición de caudal y vibraciones (IRE)										
Roce entre álabes y carcasa	Deterioro de álabes y carcasa	Aumento del ruido y la vibración	Desalineación de eje/rodamientos	RG: Comprobación del correcto estado del rodete y los álabes (IRE)	7	3	7	147	Inspección del correcto estado de los álabes					
	Aumento de la temperatura	Reducción del caudal de salida	Desalineación de eje/reductor	RG: Comprobación de la alineación eje/reductor (IRE)										
	Vibración	Aumento de la temperatura	Montaje incorrecto	RG: Inspección visual del eje (IRE)										
	Ruido		Eje en mal estado	PO: Medición de caudal y vibraciones (IRE)										
Contaminación del rodete	Ruido	Reducción de la velocidad de salida	Ambientes contaminados	RG: Limpieza e inspección del rodete (IRE)	7	3	7	147	Comprobar el correcto estado de los álabes y su limpieza					
	Deterioro de álabes	Aumento de la vibración		PO: Medición de la velocidad de rotación y vibraciones (IRE)										
	Vibración	Aumento de temperatura	Rodete obstruido											

Nota: PO: Pruebas de operación. RG: Revisión general. RE: Revisiones eléctricas.

AMFEC reductor de velocidad VTR08A															
Equipo	Función del equipo	Componente	Función componente	Fallo				Índices Actuales				Acciones posibles (PM y de monitorización)	Plan de mantenimiento		
				Modo	Efecto (local)	Efecto (final)	Causa	Controles actuales (tareas)	Severidad	Ocurrencia	No detección			IPR	
Reductor de velocidad ventilador VTR08A	Controlar y variar la revoluciones por minuto del motor asociado	Engranajes	Transmitir potencia mecánica de un componente a otro	Lubricación	Desgaste (adhesivo y abrasivo)	Reducción de la velocidad de rotación debido a fricción	Lubricación insuficiente, excesiva o inadecuada	RG: Análisis de aceite del reductor (IRE)	7	3	7	147	Análisis de la lubricación (aceite)		
					Corrosión	Aumento de la vibración y el ruido	Temperaturas elevadas que degradan la lubricación	PO: Medición de la velocidad de rotación y vibraciones (IRE)					Ensayos no destructivos (Inspe. LP)		
					Aumento de la temperatura	Aumento de la temperatura	Lubricación contaminada (agua, ácido...).						Inspección de sellos junto con limpieza y descontaminación del área de trabajo.		
					Vibración		Sellos en mal estado						Monitorización de la temperatura (local)		
					Ruido								Monitorización de la velocidad de rotación		
					Aumento de la fricción								Monitorización de nivel lubricación (aceite)		
		Rayado				Monitorización de vibración (local)									
						Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control)									
						Ruido	Aumento de la temperatura	Exceso de corriente	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y de la puesta a tierra (IRE)	3	2	8	48		Monitorización de la vibración (local)
						Vibración	Reducción de la velocidad debido a fricción	Fuga de corriente	PO: Medición de la velocidad de rotación y vibraciones (IRE)						Prueba de aislamiento, fuga de corriente y puesta a tierra (motor)
						Erosión eléctrica en la zona dentada	Aumento del ruido y la vibración	Puesta a tierra dañada							Monitorización de la temperatura (local)
						Aumento de la fricción									Ensayos no destructivos (Inspe. LP)
				Desgaste				Monitorización de la velocidad de rotación							
				Picaduras (erosión)				Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control)							
								Análisis de la lubricación (aceite)							
		Rodamientos	Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el giro	Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	Aumento de la fricción	Aumento de la temperatura	Exceso de corriente	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y puesta a tierra (IRE)	3	2	8	48	Inspección del estado de los rodamientos		
							Aumento de la temperatura	Reducción de la velocidad debido a fricción					Fuga de corriente	PO: Medición de la velocidad de rotación y vibraciones (IRE)	Monitorización de la temperatura (local)
							Decoloración (gris claro a gris oscuro)	Aumento del ruido y la vibración					Puesta a tierra dañada		Monitorización de la velocidad de rotación (final)
							Desgaste						Paso de corriente al soldar (soldadura por arco eléctrico cerca del reductor)		Monitorización de la vibración (local)
							Estrizado								Prueba de aislamiento, fugas de corriente y puesta a tierra (Motor)
							Picaduras (erosión)								Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y una velocidad de rotación inadecuada (en sala de control)
				Ruido											
				Vibración											
				Contaminación	Vibración	Aumento de la temperatura	Áreas de trabajo contaminadas	RG: Análisis de aceite del reductor (IRE)	5	4	8	160	Análisis de lubricante (aceite)		
							Desgaste	Aumento del ruido y la vibración					Lubricantes inadecuados o degradados	PO: Medición de vibraciones (IRE)	Inspección de sellos junto con limpieza, descontaminación del área de trabajo...
							Ruido						Sellado en mal estado o mal instalado (p.e sellos mal orientados)		Monitorización de la temperatura (local)
							Picaduras						Mal almacenaje		Monitorización de la vibración (local)
							Corrosión						Herramientas de trabajo en mal estado		Múltiples sellos (cambio de diseño)
															Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas y temperatura anormal (en sala de control)
				Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	Pérdida de dureza	Aumento de la temperatura	Elevada carga eléctrica	RG: Análisis de aceite del reductor (IRE)	3	4	8	96	Ampliar el juego interno (cambio de diseño)		
							Deformación de los elementos rodantes						Carga excesiva	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y puesta a tierra (IRE)	Análisis de lubricante (aceite)
							Deformación de los anillos						Refrigeración insuficiente		Control de sobrecarga
							Degradación del lubricante						Lubricación inadecuada, excesiva o insuficiente		Inspección en busca de decoloramientos en anillos, elementos rodantes y jaulas, deformaciones...
							Decoloración intensa						Temperaturas de funcionamiento excesivas		Monitorización de control de nivel de lubricación
													Juego interno insuficiente		Monitorización de la temperatura (local)
				Lubricación	Aumento de la temperatura	Aumento de la temperatura	Lubricación inadecuada o insuficiente.	RG: Análisis de aceite del reductor (IRE)	5	4	8	160	Análisis de lubricante (aceite)		
							Ruido	Aumento del ruido y la vibración					Temperatura excesiva que degrada al lubricante	PO: Medición de velocidad de rotación y vibraciones (IRE)	Inspección de fugas de lubricante
							Fatiga	Reducción de la velocidad debido a fricción					Sellos en mal estado		Inspección del estado de los sellos, decoloraciones y desgaste de la pista de rodadura y elementos rodantes
							Vibración								Inspección en busca de fugas
							Aumento de la fricción								Monitorización de la temperatura (local)
							Desgaste (abrasivo, vibro corrosivo, adhalvo)								Monitorización de la velocidad de rotación (final)
				Desalineación entre los elementos rodantes y la pista	Ruido	Aumento de la temperatura	Desalineamiento del eje	RG: Comprobación de la alineación del eje (IRE)	5	3	8	120	Comprobación de la alineación del eje y el acoplamiento		
							Vibración	Reducción de la velocidad debido a fricción					Eje doblado	PO: Medición de velocidad de rotación y vibraciones (IRE)	Inspección en busca de desgaste en los caminos de rodadura y elementos rodantes
							Aumento de la fricción	Aumento del ruido y la vibración					Sobrecalentamiento		Monitorización de la temperatura (local)
							Aumento de la temperatura						Instalación incorrecta		Monitorización de la velocidad de rotación (final)
							Desgaste						Sobrecarga		Monitorización de la vibración (local)
															Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas, temperatura anormal y velocidad de rotación inadecuada (en sala de control)
				Vibroc corrosión	Estrizado en los caminos de rodadura	Ruido en el ventilador que se encuentra parado	Vibraciones externas durante paradas	RG: Girar rodete a mano cuando cuando se está realizando la revisión general (IRE)	3	2	8	48	Amortiguadores de vibración (cambio de diseño)		
															Girar los equipos parados a intervalos regulares
															Lubricación con propiedades de antivibroc corrosión (cambio de diseño)
															Inspección de sellos junto con limpieza, descontaminación del área de trabajo...
															Monitorización de la temperatura
															Monitorización de la velocidad de rotación (final)
		Sellos	Retener la contaminación y la fuga de aceite del reductor	Desgaste	Aumento de la temperatura	Aumento del ruido y la vibración	Error de montaje	RG: Comprobación de la alineación del eje (IRE)	4	5	8	160	Inspección de sellos junto con limpieza, descontaminación del área de trabajo...		
							Aumento de la fricción	Reducción de la velocidad debido a fricción					Temperaturas elevadas que degradan el material	PO: Medición de la velocidad (IRE)	Monitorización de la temperatura
					Degradación de elementos internos del reductor	Desalineamiento del eje	Temperaturas elevadas que degradan el material	RG: Análisis de aceite del reductor (IRE)					Monitorización de la velocidad de rotación (final)		
					Fuga de aceite	Contaminantes	Ataque químico	RO: Comprobación de vibraciones(1T)					Monitorización de la vibración		
													Pruebas de alineación eje/reductor		
													Rondas de operador en de vibraciones extrañas (en sala de control)		
													Análisis de lubricación (aceite)		

Nota: PO: Pruebas de operación. RG: Revisión general. RE: Revisiones eléctricas.

El plan de mantenimiento propuesto se muestra en el apartado 1.1 del documento TFM_Boulanour Al Massati_Samir

AMFEC acoplamiento VTR08A

Equipo	Función del equipo	Componente	Función componente	Fallo			Controles actuales (tareas)	Índices Actuales				Acciones posibles (PM y de monitorización)	Plan de mantenimiento	
				Modo	Efecto (local)	Efecto (final)		Causa	Severidad	Ocurrencia	No detección			IPR
Acoplamiento flexible ventilador VTR08A	Conectar el eje del ventilador junto con el eje del reductor de velocidad. Transmitir el par de torsión del motor de baja tensión asociado. Ajustarse a cierto grado de desalineación entre los ejes	Elastómero	Compensar la desalineación entre ejes y absorber los golpes del motor o del ventilador	Desgaste del elastómero	Aumento de la vibración Ruido Aumento de la temperatura	Aumento de la vibración y el ruido Aumento de la temperatura Deterioro de componentes principales Desgaste de los cubos de	Desalineación excesiva entre ejes Temperaturas muy altas/bajas causando alteración física del elastómero Ataque químico	RG: Comprobación de la alineación del eje (IRE)	7	2	7	98	Inspección del acoplamiento (p.e. revisar grosor entre cubos, desmontar, limpiar) Monitorización de la temperatura Monitorización de la vibración Pruebas de alineación eje/reductor Rondas de operador en busca de vibraciones extrañas y una temperatura anormal	El plan de mantenimiento propuesto se muestra en el apartado 1.1 del documento TFM_Boulounar Al Massati_Samir

Nota: RG: Revisión general.

Ventilador centrífugo VTC02A

Refrigerar el generador diésel de emergencia. Mover un caudal de aire de 30000 m3/h a una velocidad de 1300 rpm

Compañía interesada:	Central Nuclear XX	Fecha de inicio:	01-feb	del	2022	Autor:	Samir Boulanouar Al Massati	Aprobado por:	Silvia De La Flor López
Cód. id. Equipo:	Ventilador VTC02A	Versión:	1			Revisado por:	Silvia De La Flor López	Fecha aprobación:	06-jun del 2022

AMFEC ventilador VTC02A

Equipo	Función del equipo	Componente	Función componente	Fallo				Índices Actuales				Acciones posibles (PM y de monitorización)	Plan de mantenimiento				
				Modo	Efecto (local)	Efecto (final)	Causa	Controles actuales (tareas)	Severidad	Ocurrencia	No detección			IPR			
Ventilador centrífugo VTC02A	Refrigerar el generador diésel de emergencia. Mover un caudal de aire de 30000 m3/h a una velocidad de 1300 rpm	Rodamientos	Reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas. Apoyar y guiar el rotación	Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	Ruido Vibraciones Aumento de la temperatura Aumento de la fricción Desgaste Picaduras (erosión) Decoloración (gris claro a gris oscuro) Estrado	Aumento de la temperatura Reducción de la velocidad debido a fricción Aumento del ruido y la vibración	Exceso de corriente Fuga de corriente Puesta a tierra dañada Paso de corriente al soldar (Soldadura por arco eléctrico cerca del ventilador) **La corriente puede venir por electricidad estática de la correa que puede pasar a través del eje hasta el rodamiento y luego hasta el suelo.	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y puesta a tierra (IRE) RO: Comprobación ruidos y vibraciones extrañas (IT). PO: Medición de vibraciones y velocidad de rotación(18M) RP: Revisión parcial del rodamiento (inspección visual y comprobación de ruidos extraños) (18M)	3	3	7	63	Monitorización de la temperatura (local) Monitorización de la vibración (local) Prueba de aislamiento, fugas y puesta a tierra (motor) Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas Monitorización de la velocidad de rotación (final)				
				Contaminación	Vibraciones Desgaste Ruido Picaduras Corrosión	Aumento de la temperatura Aumento del ruido y la vibración	Áreas de trabajo contaminadas Lubricantes inadecuados o degradados Sellado en mal estado o mal instalado (p.e sellos mal orientados) Mal almacenaje Herramientas de trabajo en mal estado	RO: Comprobación de fugas, ruidos y vibraciones anormales (IT). PO: Medición de vibraciones (18M) RP: Comprobación fuga de grasa (18M) RP: Revisión parcial del rodamiento (inspección visual y comprobación de ruidos extraños) (18M)	5	4	8	160	Análisis de lubricante Inspección de sellos junto con limpieza y descontaminación del área de trabajo. Monitorización de la temperatura (local) Monitorización de la vibración (local) Múltiples sellos (cambio de diseño) Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas				
				Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	Pérdida de dureza Deformación elementos rodantes Deformación anillos Degradación del lubricante Decoloración intensa	Aumento de la temperatura	Elevada carga eléctrica Carga excesiva Refrigeración insuficiente Lubricación inadecuada, excesiva o insuficiente Juego interno insuficiente	RE: Pruebas de aislamiento de debanados del motor y puesta a tierra (IRE) RP: Engrasar rodamientos (18M)	3	4	7	84	Ampliar el juego interno (Cambio de diseño) Análisis de lubricante Control de sobrecarga Inspección en busca de descoloramientos en anillos, elementos rodantes y jaulas, deformaciones... Monitorización de la temperatura (local) Monitorización de la velocidad de rotación (final) Monitorización de nivel lubricante Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación) Refrigeración suplementaria (cambio de diseño) Prueba de aislamiento, fugas de corriente y puesta a tierra (motor) Rondas de operación en busca de ruidos y vibraciones extrañas				
				Lubricación	Aumento de la temperatura Ruido Fatiga Vibración Aumento de la fricción Desgaste (abrasivo, vibro corrosivo, adhesivo)	Aumento de la temperatura Aumento del ruido y la vibración Reducción de la velocidad debido a fricción	Lubricación inadecuada o insuficiente. Temperatura excesiva que degrada al lubricante Sellos en mal estado	RO: Comprobación de fugas, ruidos y vibraciones anormales (IT). PO: Medición de vibraciones y velocidad de rotación (18M) RP: Comprobación fuga de grasa (18M) RP: Revisión parcial del rodamiento (inspección visual y comprobación de ruidos extraños) (18M) RP: Engrasar rodamientos (18M) RP: Engrasar rodamientos (18M)	5	4	8	160	Análisis de lubricante Inspección del estado de los sellos, decoloraciones y desgaste de pista de rodadura y elementos rodantes Monitorización de la temperatura (local) Monitorización de la velocidad de rotación (final) Monitorización de la vibración (local) Monitorización de nivel de lubricante Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación) Rondas de operador en busca de fugas, ruidos y vibraciones extrañas Inspección de fugas de lubricante				
				Desalineación entre los elementos rodantes y la pista de rodadura	Ruido Vibración Aumento de la fricción Aumento de la temperatura Desgaste	Aumento de la temperatura Reducción de la velocidad debido a fricción Aumento del ruido y la vibración	Ejes no paralelos (ventilador/motor) Eje doblado Sobrecalentamiento Instalación incorrecta Sobrecarga	RO: Comprobación de fugas, ruidos y vibraciones anormales (IT). PO: Medición de vibraciones y velocidad de rotación y temperatura (18M) RP: Revisión parcial del rodamiento (inspección visual y comprobación de ruidos extraños) (18M)	5	3	7	105	Comprobación del paralelismo de los ejes (ventilador/motor) Inspección en busca de desgaste en los caminos de rodadura y elementos rodantes Monitorización de la temperatura (local) Monitorización de la velocidad de rotación (final) Monitorización de la vibración (local) Monitorización por técnica ultrasónica (para lubricación) Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas				
				Vibroc corrosión	Estrado en los caminos de rodadura	Ruido en el ventilador que se encuentra parado	Vibraciones externas durante paradas	RO: Comprobación de ruidos (IT) RP: Revisión parcial del rodamiento (inspección visual y comprobación de ruidos extraños) (18M)	3	2	7	42	Amortiguadores de vibración (cambio de diseño) Girar los equipos parados a intervalos regulares Lubricación con propiedades de antivibroc corrosión (cambio de diseño)				
		Eje	Guiar el movimiento de rotación al ventilador	Desgaste (adhesivo y abrasivo) y corrosión	Aumento de vibraciones Aumento de la fricción Aumento de la temperatura	Aumento de vibraciones Reducción de velocidad debido a fricción Aumento de la temperatura	Lubricación insuficiente Lubricación inadecuada/contaminada Altas temperaturas Rodamientos dañados/desgastados Ajuste de ramientos incorrecto Sellos en mal estado	RO: Comprobación de vibraciones (IT) PO: Medición de vibraciones y velocidad de rotación(18M) RP: Engrasar rodamientos (18M) RP: Revisión parcial del rodamiento (inspección visual y comprobación de ruidos extraños) (18M)	3	3	7	63	Análisis de lubricante Comprobación del correcto ajuste (si se desea cambiar el rodamiento) Ensayos no destructivos (Inspe. LP, ET, UT) Inspección de rodamientos Inspección visual del eje Monitorización de la temperatura Monitorización de nivel de lubricación Monitorización de la velocidad (local) Monitorización de la vibración Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas				
					Rodete	Impulsar el fluido a través de sus álabes	Desgaste los álabes (Erosión, corrosión...)	Vibraciones	Reducción del caudal de salida Aumento del ruido y la vibración	Ambientes contaminados (el ventilador succiona aire exterior que podría contener sal marina (central cercal del mar), ambientes muy húmedos o corrosivos. Rozce entre álabes y carcasa	RO: Comprobación de ruidos y vibraciones(1T) RP: Observar el estado de los álabes (18M) PO: Medición de vibraciones y caudal (18M)	7	3		5	105	Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas Inspección del correcto estado de los álabes Ensayos no destructivos en los álabes (inspe. LP) Monitorización de la vibración Monitorización de la velocidad de rotación (local)
							Rozce entre álabes y carcasa	Deterioro de álabes y carcasa Aumento de la temperatura Aumento de vibraciones Ruido	Aumento del ruido y de la vibración Reducción del caudal de salida Aumento de la temperatura	Desalineación de eje/rodamientos Ejes del ventilador y de motor no paralelos Montaje incorrecto Eje en mal estado	RO: Comprobación ruidos y vibraciones (1T) PO: Medición de vibraciones y caudal(18M) RP: Observar el estado de los álabes (18M)	7	3		5	105	Inspección del correcto estado de los álabes Monitorización de la vibración (local) Monitorización de la temperatura Monitorización de la velocidad de rotación (local) Procedimientos de montaje con doble revisión Pruebas de alineación y comprobar correcto estado del eje Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas
		Contaminación del rodete	Ruido Deterioro de álabes Aumento de vibraciones	Reducción de caudal de salida Aumento de vibraciones Aumento de temperatura Rodete obstruido	Ambientes contaminados	RO: Comprobación ruidos y vibraciones (1T) PO: Medición de vibraciones y caudal(18M) RP: Limpieza de álabes y rodete (18) RP: Observar el estado de los álabes (18M)	8	4	5	160	Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas Monitorización de la vibración (local) Monitorización de la temperatura Monitorización de la velocidad de rotación (local) Comprobar el correcto estado de los álabes y su limpieza						
		Sistema polea/correa	Transmitir velocidad y potencia del motor al ventilador	Tensión de la correa inadecuada	Desgaste de la polea y la correa Aumento de la temperatura Deslizamiento de la correa Fatiga de la correa (cuando la tensión es excesiva) Endurecimiento de la correa (Debido al aumento de la temperatura) ruido	Variación de la relación de transmisión Reducción de la potencia de transmisión Desalineamiento de las poleas (Cuando la tensión es excesiva) Aumento del ruido	Error de instalación	PO: Medición de vibraciones y velocidad de rotación(18M) RO: Comprobación de ruidos (1T) RP: Comprobación del buen estado de las correas y las poleas (18M) RP: Comprobación del tensionado de la correa (18M)	7	4	7	196	Inspección del correcto estado del sistema de transmisión oor correa Monitorización de la temperatura Monitorización de la velocidad de rotación (final) Monitorización de vibraciones Monitorización del alineamiento de las poleas Comprobar el tensado de la correa Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas				
					Desalineamiento entre poleas	Desgaste de la correa Ruido Aumento de la temperatura Aumento de la vibración	Aumento del ruido y la vibración Reducción de la potencia de transmisión	Sobretención de la correa Ejes no paralelos	PO: Medición de vibraciones y velocidad de rotación (18M) RO: Comprobación ruidos y vibraciones (1T) RP: Comprobación del tensionado de la correa (18M) RP: Comprobación del buen estado de las correas y las poleas (18M)	7	4	7	196		Inspeccionar el correcto estado del sistema de transmisión por correa Monitorización de la temperatura Monitorización de la velocidad de rotación (final) Monitorización de vibraciones Monitorización del alineamiento de las poleas Comprobar el tensado de la correa Rondas de operador en busca de ruidos y vibraciones extrañas		

Notas: RO: Rondas de operador. PO: Pruebas de operación. RG: Revisión general. RE: Revisiones eléctricas.

El plan de mantenimiento propuesto se muestra en el apartado 11 del documento TFM_Boulanouar Al Massati_Samir

10.4. Análisis de Pareto del ventilador VTR08A

El análisis de Pareto para VTR08A se realizará con los modos de fallo del sistema que forman el ventilador VTR08A, el reductor de VTR08A y el acoplamiento de VTR08A con el fin de crear un único plan de mantenimiento que agrupe las tareas y las actuaciones.

Siguiendo los pasos expuestos en el apartado 7, se realiza el análisis de Pareto del sistema VTR08A.

A continuación, se muestra en la tabla 10.19, todos los modos de fallo del sistema VTR08A ordenados por IPR, de mayor a menor, junto con el respectivo porcentaje respecto a la suma de los IPR y el porcentaje acumulado.

Tabla 10.19. Análisis de Pareto por IPR de los modos de fallo del sistema VTR08A.

Modos de fallo	Localización del modo de fallo	IPR	% Acumulado IPR	% IPR
Contaminación	Rodamiento Reductor	160	7%	7%
Lubricación	Rodamiento Reductor	160	14%	7%
Desgaste	Sellos Reductor	160	22%	7%
Lubricación	Engranaje Reductor	147	28%	7%
Contaminación del rodete	Rodete Ventilador	147	35%	7%
Desalineación eje/acoplamiento	Eje Ventilador	147	42%	7%
Roce entre álabes y carcasa	Rodete Ventilador	147	48%	7%
Contaminación	Rodamiento Ventilador	140	54%	6%
Lubricación	Rodamiento Ventilador	140	61%	6%
Desalineación entre los elementos rodantes y la pista	Rodamiento Reductor	120	66%	5%
Desalineación entre los elementos rodantes y la pista	Rodamiento Ventilador	105	71%	5%
Desgaste del elastómero	Elastómero acoplamiento	98	75%	4%
Desgaste en los álabes (corrosión, erosión...)	Rodete Ventilador	98	80%	4%
Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	Rodamiento Reductor	96	84%	4%
Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	Rodamiento Ventilador	84	88%	4%
Erosión eléctrica en la zona dentada	Engranaje Reductor	48	90%	2%
Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	Rodamiento Reductor	48	92%	2%
Vibrocorrosión	Rodamiento Reductor	48	94%	2%
Desgaste (Adhesivo y abrasivo) y corrosivo	Eje Ventilador	42	96%	2%
Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	Rodamiento Ventilador	42	98%	2%
Vibrocorrosión	Rodamiento Ventilador	42	100%	2%

A continuación, en la figura 10.14, se muestra el diagrama resultante de la tabla 10.19.

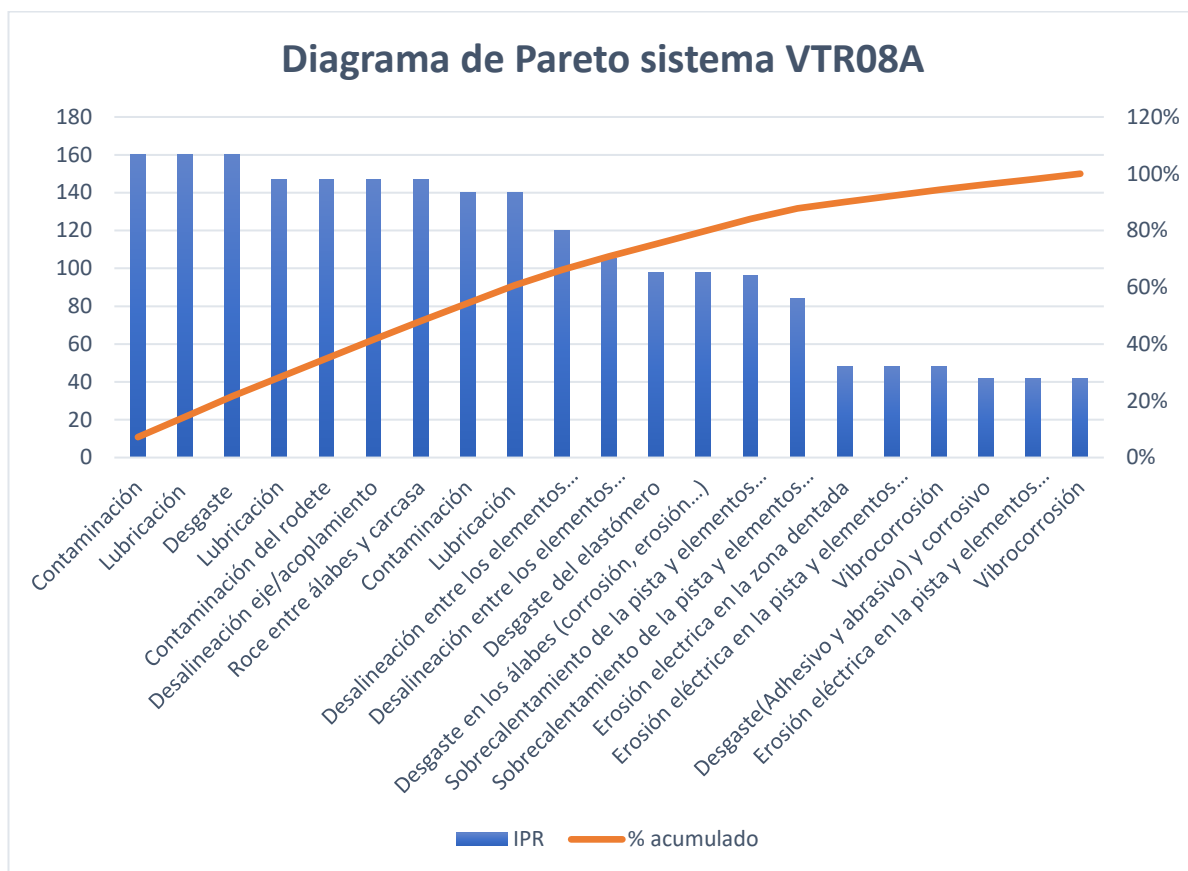


Figura 10.14. Diagrama de Pareto sistema VTR08A.

Como se puede observar en el diagrama de Pareto de la figura 10.14, los modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del sistema VTR08A, son los siguientes:

Tabla 10.20. Modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del sistema VTR08A.

Modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del sistema VTR08A	Localización del modo de fallo
Contaminación	Rodamiento Reductor
Lubricación	Rodamiento Reductor
Desgaste	Sellos Reductor
Lubricación	Engranaje Reductor
Contaminación del rodete	Rodete Ventilador
Desalineación eje/acoplamiento	Eje Ventilador
Roce entre álabes y carcasa	Rodete Ventilador
Contaminación	Rodamiento Ventilador
Lubricación	Rodamiento Ventilador
Desalineación entre los elementos rodantes y la pista	Rodamiento Reductor
Desalineación entre los elementos rodantes y la pista	Rodamiento Ventilador
Desgaste del elastómero	Elastómero acoplamiento

Modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del sistema VTR08A	Localización del modo de fallo
--	---------------------------------------

Desgaste en los álabes (corrosión, erosión...)	Rodete Ventilador
--	-------------------

El plan de mantenimiento que se propone se centrará en los modos de fallo expuestos en la tabla 10.20 consiguiendo así, cubrir como mínimo el 80% de los fallos del sistema VTR08A.

10.5. Análisis de Pareto del ventilador VTC02A

Siguiendo los pasos expuestos en el apartado 7, se realiza el análisis de Pareto del ventilador VTC02A.

A continuación, se muestra en la tabla 10.21, todos los modos de fallo del ventilador VTC02A ordenados por IPR, de mayor a menor, junto con el respectivo porcentaje respecto a la suma de los IPR y el porcentaje acumulado.

Tabla 10.21. Análisis de Pareto por IPR de los modos de fallo del sistema VTC02A.

Modos de fallo	Localización del modo de fallo	IPR	% Acumulado IPR	% IPR
Tensión de la correa incorrecta	Sistema correas/poleas	196	14%	14%
Desalineación entre poleas	Sistema correas/poleas	196	28%	14%
Contaminación	Rodamientos	160	39%	11%
Lubricación	Rodamientos	160	50%	11%
Contaminación del rodete	Rodete	140	60%	10%
Roce entre álabes y carcasa	Rodete	105	67%	7%
Desgaste en los álabes (corrosión, erosión...)	Rodete	105	75%	7%
Desalineación entre los elementos rodantes y la pista	Rodamientos	105	82%	7%
Sobrecalentamiento de la pista y elementos rodantes	Rodamientos	84	88%	6%
Erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes	Rodamientos	63	93%	4%
Desgaste (adhesivo y abrasivo) y corrosión	Eje	63	97%	4%
Vibrocorrosión	Rodamientos	42	100%	3%

A continuación, se muestra el diagrama resultante de la figura 10.15.

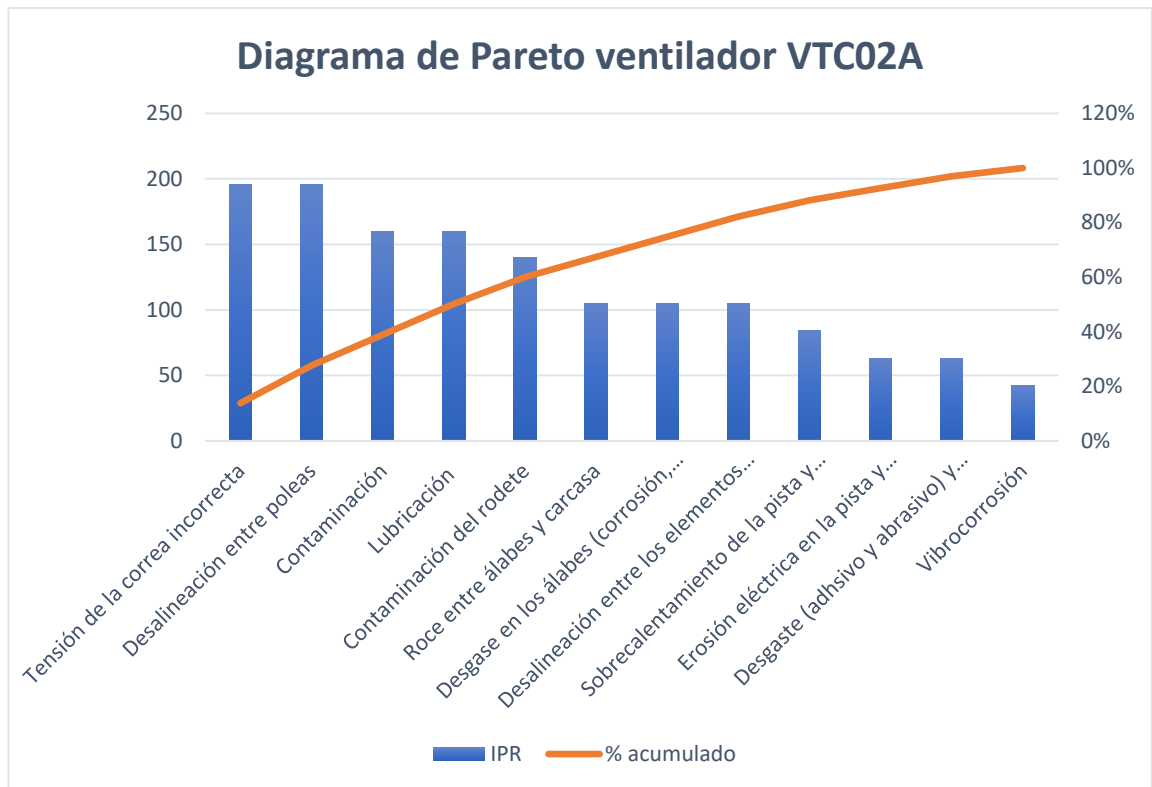


Figura 10.15. Diagrama de Pareto del ventilador VTC02A.

Como se puede observar en el diagrama de Pareto de la figura 10.15, los modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del ventilador VTC02A, son los siguientes:

Tabla 10.22. Modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del ventilador VTC02A.

Modos de fallo que provocan el 80% de los fallos del sistema VTC02A	Localización del modo de fallo
Tensión de la correa incorrecta	Sistema correas/poleas
Desalineación entre poleas	Sistema correas/poleas
Contaminación	Rodamientos
Lubricación	Rodamientos
Contaminación del rodete	Rodete
Roce entre álabes y carcasa	Rodete
Desgaste en los álabes (corrosión, erosión...)	Rodete

El plan de mantenimiento que se propone se centrará en los modos de fallo expuestos en la tabla 10.22 consiguiendo así, cubrir como mínimo el 80% de los fallos del ventilador VTC02A.

10.6. Análisis de Weibull para el ventilador VTR08A

Una vez indexados mediante el Índice de Prioridad de Riesgo (IPR) todos los modos de fallo estudiados en el análisis AMFEC, se escoge el modo de fallo con un IPR más elevado para el sistema VTR08A y se realiza el análisis de Weibull para este modo de fallo. En este caso, el modo de fallo con un IPR más elevado es el modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor de velocidad VTR08A.

Utilizando históricos de mantenimiento de los últimos 20 años de la Central Nuclear XX y filtrando por las órdenes de mantenimiento de carácter correctivo relacionadas con el modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor, se encuentran las horas de buen funcionamiento (horas entre fallos) del sistema VTR08A y se ordenan de menor a mayor. Estas se muestran a continuación, tabla 10.23.

Tabla 10.23. Horas de buen funcionamiento para el modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A

i	Horas de buen funcionamiento
1	13140
2	17535
3	21024
4	24528
5	43800
6	48180

Utilizando las expresiones mostradas en el apartado 8.1 se obtiene el rango medio y los datos necesarios para la recta de regresión, estos se muestran a continuación en la tabla 10.24.

Tabla 10.24. Rango medio y valores para la recta de regresión del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A

i	Horas de buen funcionamiento (t)	Rango medio (RM)	X	Y
1	13140	0,11	9,48	-2,16
2	17535	0,27	9,77	-1,18
3	21024	0,42	9,95	-0,60
4	24528	0,58	10,11	-0,15
5	43800	0,73	10,69	0,28
6	48180	0,89	10,78	0,79

Utilizando los datos de la tabla 10.24, se representa la recta de regresión de Weibull que permitirá obtener el parámetro de forma (β) y el parámetro de escala (η).

A continuación, en la figura 10.16, se muestra la recta de regresión de Weibull basada en los datos de horas de buen funcionamiento del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A.

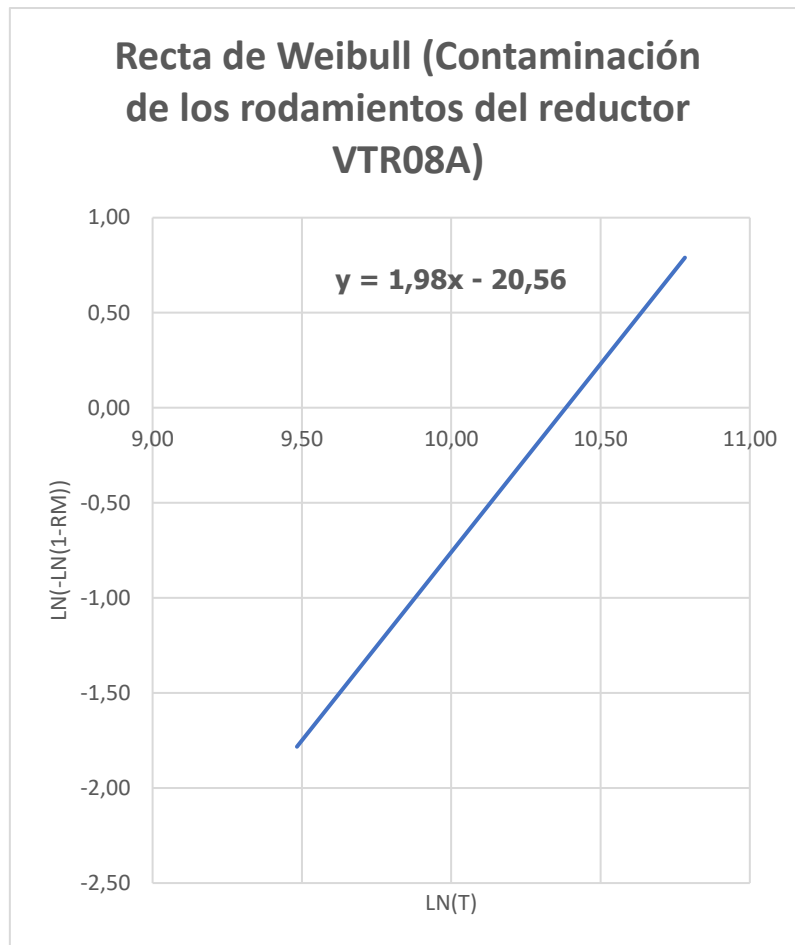


Figura 10.16. Representación de la recta de regresión del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A

Junto con los datos obtenidos de la recta de regresión y haciendo uso de la fórmula 8.4, se obtienen los siguientes parámetros.

Tabla 10.23. Parámetros de Weibull para el modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A

Parámetro	Valor
β	1,98
η (horas)	31609

Tal y como se observa en la tabla 10.23, el parámetro de forma (β) es mayor a 1 por lo que indica que la naturaleza de los fallos es por envejecimiento y desgaste.

Con los parámetros obtenidos en la tabla 10.23 y las ecuaciones 8.1, 8.3 y 8.6 se puede modelizar la fiabilidad y la probabilidad de fallo respecto al tiempo del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A. El resultado de la modelización se muestra a continuación, tabla 10.24.

Tabla 10.24. Modelización de la fiabilidad y la probabilidad de fallo frente al tiempo del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A

Tiempo (horas)	Fiabilidad	Densidad de Weibull	Tasa de fallos	Probabilidad de fallo
1	100%	2,44E-09	2,44E-09	0%
5000	97%	1,00E-05	1,03E-05	3%
10000	90%	1,83E-05	2,03E-05	10%
15000	80%	2,40E-05	3,02E-05	20%
20000	67%	2,67E-05	4,00E-05	33%
25000	53%	2,65E-05	4,98E-05	47%
30000	41%	2,42E-05	5,95E-05	59%
35000	29%	2,04E-05	6,92E-05	71%
40000	20%	1,60E-05	7,89E-05	80%
45000	13%	1,18E-05	8,85E-05	87%
50000	8%	8,23E-06	9,82E-05	92%
55000	5%	5,40E-06	1,08E-04	95%
60000	3%	3,35E-06	1,17E-04	97%
65000	2%	1,97E-06	1,27E-04	98%
70000	1%	1,09E-06	1,37E-04	99%
75000	0%	5,77E-07	1,46E-04	100%

Utilizando los datos de la tabla 10.24 se realiza el diagrama de fiabilidad y probabilidad de fallo frente al tiempo, figura 10.17, y el diagrama que muestra la distribución de Weibull frente al tiempo, figura 10.18.

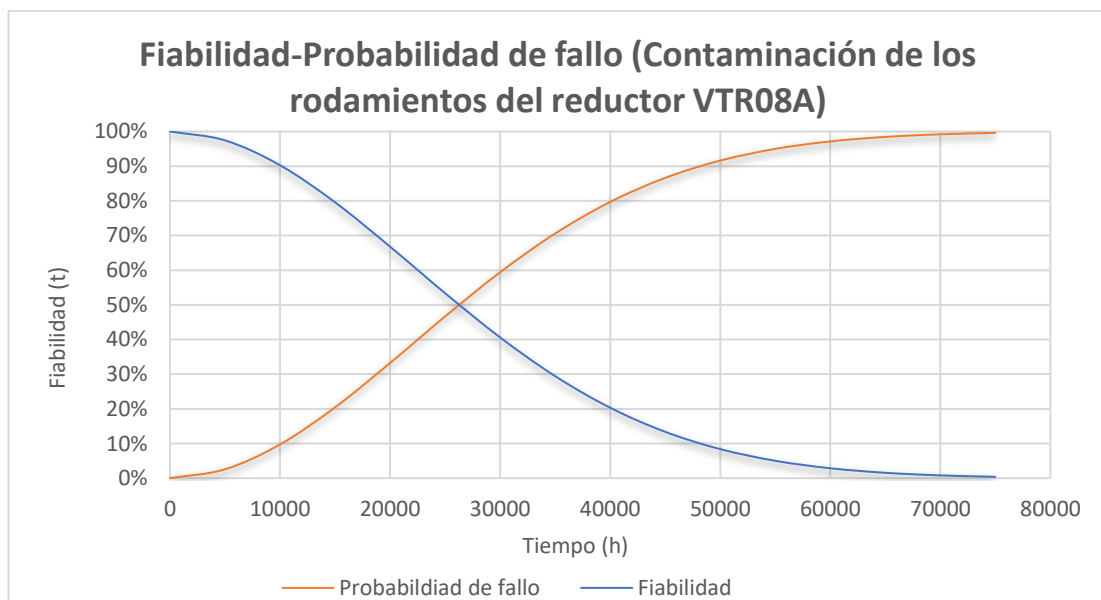


Figura 10.17. Fiabilidad y probabilidad de fallo frente al tiempo del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A.

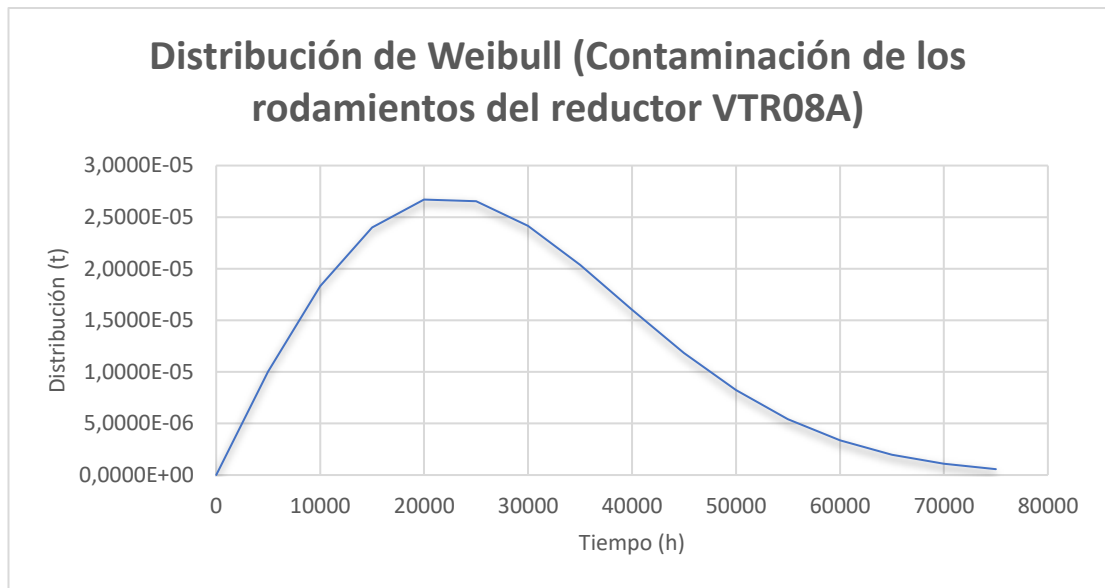


Figura 10.18. Distribución de Weibull del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A.

Haciendo uso de los datos mostrados en las tablas 10.23 junto con la figura 8.2, se obtiene el tiempo medio entre fallos (MTBF) para el modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A. Este se muestra a continuación, tabla 10.25.

Tabla 10.25. Tiempo medio entre fallos del modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A.

Parámetro	Valor
MTBF (horas)	28012
MTBF (años)	3,2

Se han comparado los resultados obtenidos para el modo de fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A mediante el software profesional de análisis de confiabilidad y mantenimiento *Reliasoft*.

A continuación, en la tabla 10.26, se muestra la comparación entre los resultados obtenidos sin hacer uso del software y mediante él.

Tabla 10.26. Comparación de resultados obtenidos mediante el software de *Reliasoft* para el modo fallo por contaminación de los rodamientos del reductor VTR08A

Parámetro	Valor obtenido sin software	Valor obtenido mediante software (<i>Reliasoft</i>)
β	1,98	2,11
η (horas)	31609	31659
Fiabilidad (5000h) %	97	98
Fiabilidad (30000h) %	41	41
MTBF (horas)	28012	28037
MTBF (años)	3,2	3,2

Como se puede observar en la tabla 10.26, los resultados son prácticamente idénticos y las pequeñas diferencias se atribuyen al cálculo del rango medio puesto que en este

proyecto se ha hecho uso de la aproximación de *Benard's* como se expone en el apartado 8.1.

10.7. Análisis de Weibull para el ventilador VTC02A

Una vez indexados mediante el Índice de Prioridad de Riesgo (IPR) todos los modos de fallos estudiados en el análisis AMFEC, se escoge el modo de fallo con un IPR más elevado para el ventilador VTC02A y se realiza el análisis de Weibull para este modo de fallo. En este caso, el modo de fallo con un IPR más elevado es el modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

Utilizando históricos de mantenimiento de los últimos 20 años de la Central Nuclear XX y filtrando por las órdenes de mantenimiento de carácter correctivo se encuentran las horas de buen funcionamiento (horas entre fallos) del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa y se ordenan de menor a mayor. Estas se muestran a continuación, tabla 10.27.

Tabla 10.27. Horas de buen funcionamiento para el modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

i	Horas de buen funcionamiento
1	12528
2	20064
3	36672
4	39264
5	63408

Utilizando las expresiones mostradas en el apartado 8.1 se obtiene el rango medio de los datos y los datos necesarios para la recta de regresión, estos se muestran a continuación en la tabla 10.28.

Tabla 10.28. Rango medio y valores para la recta de regresión del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

i	Horas de buen funcionamiento (t)	Rango medio (RM)	X	Y
1	12528	0,13	9,44	-1,97
2	20064	0,31	9,91	-0,97
3	36672	0,50	10,51	-0,37
4	39264	0,69	10,58	0,14
5	63408	0,87	11,06	0,71

Utilizando los datos de la tabla 10.28, se representa la línea la recta de regresión de Weibull que permitirá obtener el parámetro de forma (β) y el parámetro de escala (η).

A continuación, en la figura 10.19, se muestra la recta de regresión de Weibull basada en los datos de horas de buen funcionamiento del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

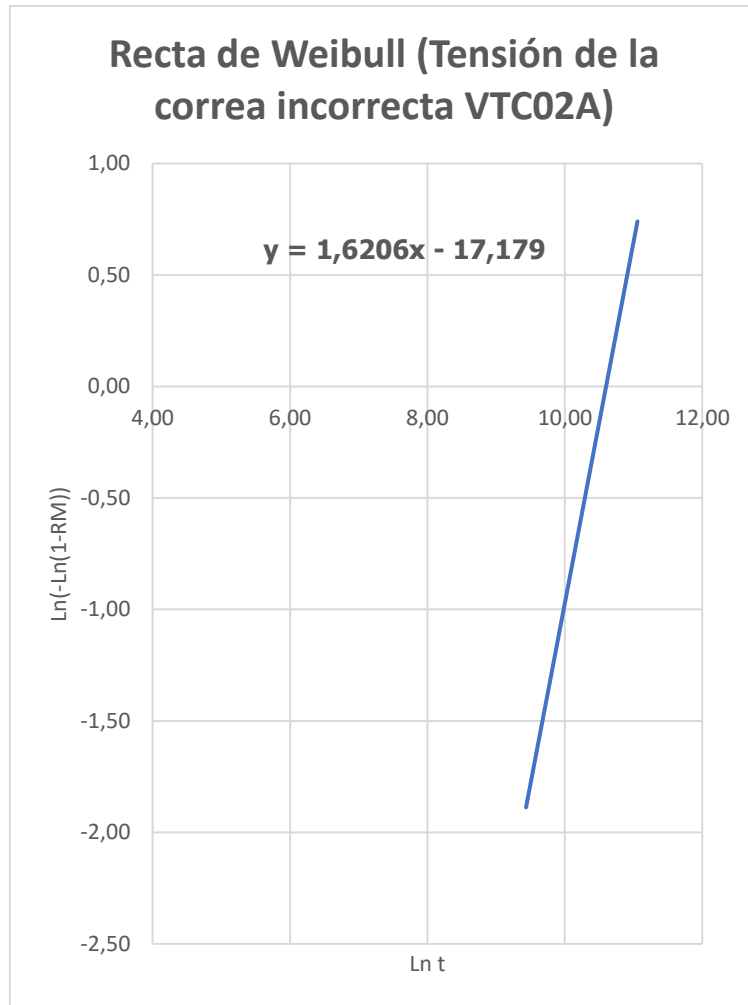


Figura 10.19. Representación de la recta de regresión del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

Junto con los datos obtenidos de la recta de regresión y haciendo uso de la fórmula 8.4, se obtienen los siguientes parámetros.

Tabla 10.29. Parámetros de Weibull para el modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

Parámetro	Valor
β	1,62
η (horas)	40151

Tal y como se observa en la tabla 10.29, el parámetro de forma (β) es mayor a 1 por lo que indica que la naturaleza de los fallos es por envejecimiento y desgaste.

Con los parámetros obtenidos en la tabla 10.29 y las ecuaciones 8.1, 8.3 y 8.6 se puede modelizar la fiabilidad y la probabilidad de fallo respecto al tiempo del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa. El resultado de la modelización se muestra a continuación, tabla 10.30.

Tabla 10.30. Modelización de la fiabilidad y la probabilidad de fallo frente al tiempo del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

Tiempo (horas)	Fiabilidad	Densidad de Weibull	Tasa de fallos	Probabilidad de fallo
1	100%	5,61E-08	5,61E-08	0%
5000	97%	1,07E-05	1,11E-05	3%
10000	90%	1,53E-05	1,70E-05	10%
15000	82%	1,79E-05	2,19E-05	18%
20000	72%	1,90E-05	2,62E-05	28%
25000	63%	1,89E-05	3,01E-05	37%
30000	54%	1,81E-05	3,37E-05	46%
35000	45%	1,66E-05	3,71E-05	55%
40000	37%	1,49E-05	4,03E-05	63%
45000	30%	1,30E-05	4,33E-05	70%
50000	24%	1,11E-05	4,63E-05	76%
55000	19%	9,28E-06	4,91E-05	81%
60000	15%	7,61E-06	5,18E-05	85%
65000	11%	6,13E-06	5,44E-05	89%
70000	9%	4,86E-06	5,70E-05	91%
75000	6%	3,79E-06	5,95E-05	94%
80000	5%	2,91E-06	6,19E-05	95%
85000	3%	2,21E-06	6,43E-05	97%
90000	2%	1,65E-06	6,66E-05	98%
95000	2%	1,21E-06	6,89E-05	98%
100000	1%	8,84E-07	7,11E-05	99%
105000	1%	6,35E-07	7,33E-05	99%
110000	1%	4,50E-07	7,54E-05	99%
115000	0%	3,16E-07	7,76E-05	100%

Utilizando los datos de la tabla 10.30 se realiza el diagrama de fiabilidad y probabilidad de fallo frente al tiempo, figura 10.20, y el diagrama que muestra la distribución de Weibull frente al tiempo, figura 10.21.

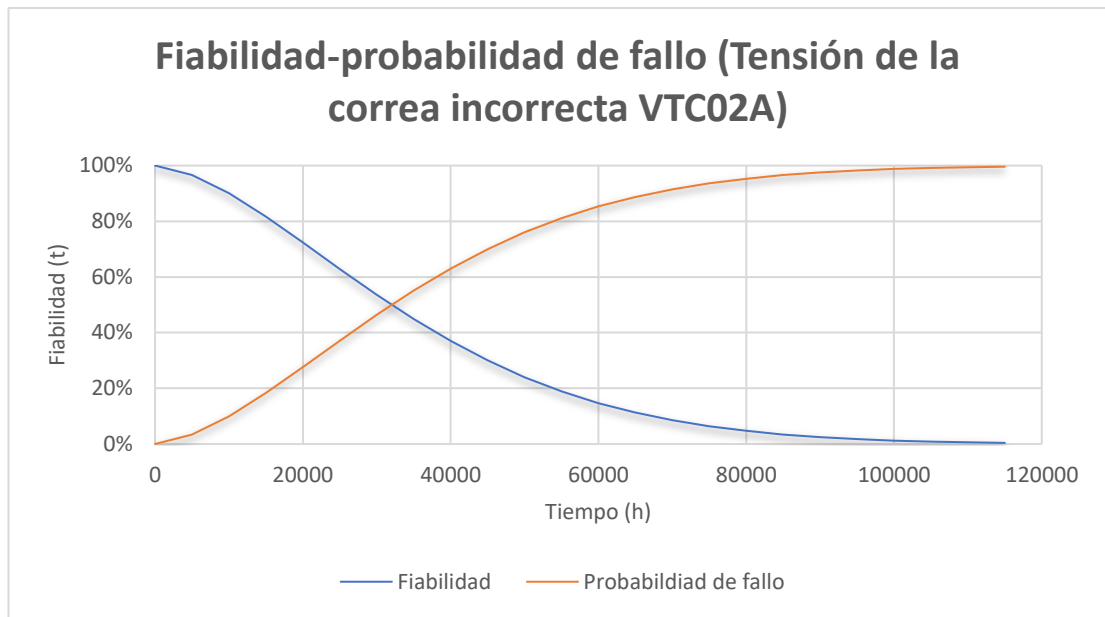


Figura 10.20. Fiabilidad y probabilidad de fallo frente al tiempo del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

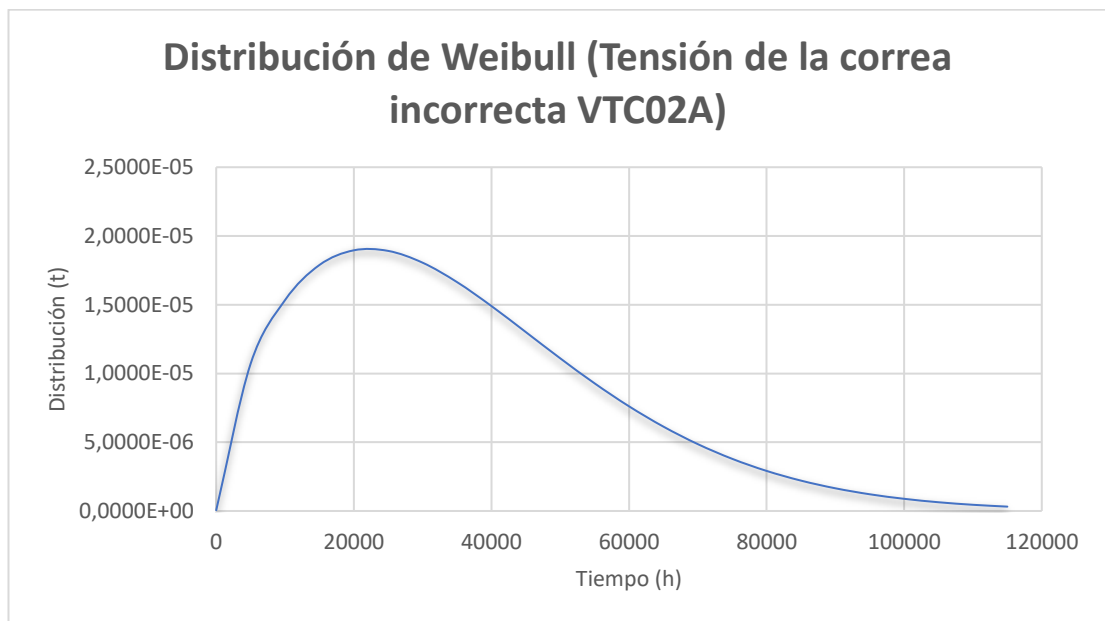


Figura 10.21. Distribución de Weibull del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

Haciendo uso de los datos mostrados en la tabla 10.29 junto con la figura 8.2, se obtiene el tiempo medio entre fallos (MTBF) para el modo de fallo por tensión incorrecta de la correa. Este se muestra a continuación, tabla 10.31.

Tabla 10.31. Tiempo medio entre fallos del modo de fallo por tensión incorrecta de la correa.

Parámetro	Valor
MTBF (horas)	35999
MTBF (años)	4,1

Se han comparado los resultados obtenidos para el modo de fallo por tensión incorrecta de la correa mediante el software profesional de análisis de confiabilidad y mantenimiento *Reliasoft*.

A continuación, en la tabla 10.32, se muestra la comparación entre los resultados obtenidos sin hacer uso del software y mediante él.

Tabla 10.32. Comparación de resultados obtenidos mediante el software de *Reliasoft* para el modo fallo por tensión incorrecta.

Parámetro	Valor obtenido sin software	Valor obtenido mediante software (<i>Reliasoft</i>)
β	1,62	1,66
η (horas)	40151	39827
Fiabilidad (5000h) %	97	97
Fiabilidad (30000h) %	54	54
MTBF (horas)	35999	35586
MTBF (años)	4,1	4,1

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior y como se observa en la tabla 10.32, los resultados son prácticamente idénticos y las pequeñas diferencias se atribuyen al cálculo del rango medio puesto que este proyecto se ha hecho uso de la aproximación de *Benard's* como se expone en el apartado 8.1.

10.8. Frecuencia óptima de mantenimiento para el ventilador VTR08A

Teniendo en cuenta que un ventilador centrífugo de estas características tiene una vida útil media de 40000 horas [32] y los datos obtenidos en el análisis de Weibull presentado en el apartado 10.6, se obtiene la frecuencia óptima de mantenimiento para el sistema VTR08A, tabla 10.33.

Tabla 10.33. Frecuencia óptima de mantenimiento para el sistema VTR08A

Parámetro	Valor
Vida útil	40000
Disponibilidad requerida	90%
MTBF (horas)	28012
Frecuencia para revisión parcial (meses)	10,0
Frecuencia para revisión general (meses)	27,4

Al tratarse de un ventilador que se encuentra dentro del edificio de contención, la frecuencia de mantenimiento debe ser cuantificada por recargas puesto que la entrada al edificio está completamente restringida. El mantenimiento de los equipos que se encuentran dentro del edificio se debe hacer durante la recarga de combustible al reactor, esto se realiza cada 18 meses, 1 recarga (RE) = 18 meses, por lo que la frecuencia de revisión parcial debe de pasarse a 1 RE y la revisión general a 2 RE.

Las rondas de operador en busca de anomalías se mantienen a una frecuencia de 1 vez cada turno puesto que es de obligado cumplimiento dentro la central.

A continuación, en la tabla 10.34 se muestra la tabla final de frecuencias de mantenimiento para el sistema VTR08A.

Tabla 10.34. Frecuencias finales de mantenimiento para el sistema VTR08A.

Tarea	Frecuencia (recargas)
Frecuencia para revisión parcial	1
Frecuencia para revisión general + revisión parcial	2

10.9. Frecuencia óptima de mantenimiento para el ventilador VTC02A

Teniendo en cuenta que un ventilador centrífugo de estas características tiene una vida útil de 40000 horas [32] y los datos obtenidos en análisis de Weibull presentado en el apartado 10.7, se obtiene la frecuencia óptima de mantenimiento para el ventilador VTC02A, tabla 10.35.

Tabla 10.35. Frecuencia óptima de mantenimiento para el ventilador VTC02A

Parámetro	Valor
Vida útil	40000
Disponibilidad requerida	90%
MTBF (horas)	35999
Frecuencia para revisión parcial (meses)	12,0
Frecuencia para revisión general (meses)	27,4

Tal y como se observa en la tabla 10.35, la frecuencia óptima de mantenimiento según la IAEA, es para la revisión parcial 12 meses y para la revisión general 27,4 meses. Para hacer coincidir la revisión parcial junto con la revisión general se propone reducir la frecuencia de la revisión general a 24 meses.

Las rondas de operador en busca de anomalías se mantienen 1 vez cada turno puesto que es de obligado cumplimiento dentro la central.

A continuación, en la tabla 10.35 se muestra la tabla final de frecuencias de mantenimiento para el ventilador VTC02A.

Tabla 10.35. Frecuencias finales de mantenimiento para el ventilador VTC02A.

Tarea	Frecuencia (meses)
Frecuencia para revisión parcial	12
Frecuencia para revisión general + revisión parcial	24

11. PLAN DE MANTENIMIENTO FINAL

Una vez obtenidos los modos de fallo que provocan el 80% de los fallos de los ventiladores, la naturaleza de sus fallos y la frecuencia óptima de mantenimiento según la IAEA, se presenta el siguiente plan de mantenimiento para el sistema VTR08A, apartado 11.1, y el plan de mantenimiento para el ventilador VTC02A, apartado 11.2.

11.1. Plan de mantenimiento propuesto para el ventilador VTR08A

VTR08A		
Descripción del plan de mantenimiento		
<p>Con este plan de mantenimiento se consigue mitigar las causas y los efectos del 80% de los modos de fallos estudiados por el análisis AMFEC presentado en el documento TFM_Boulanouar Al Massati_Samir.</p> <p>Las instrucciones para realizar las tareas del plan de mantenimiento se encuentran en dicho documento.</p>		
Alcance del plan de mantenimiento		
Ventilador VTR08A; Acoplamiento VTR08A; Reductor VTR08A.		
Tareas de cambio de diseño		
<p>a) Monitorizar rodamientos del ventilador y del reductor mediante sensores de vibración.</p> <p>b) Monitorizar eje del ventilador mediante sensores de velocidad de rotación.</p> <p>c) Monitorizar rodamientos del ventilador mediante sensores de temperatura.</p>		
Tareas de mantenimiento preventivo sistemático		
<u>Ronda de operador</u>	<u>Frecuencia</u>	1 turno
<p>a) Controlar la velocidad del ventilador en sala de control mediante sensor de velocidad instalado en el eje del ventilador.</p> <p>b) Controlar las vibraciones de los rodamientos del ventilador y del reductor en sala de control (revisar si ha saltado la alarma de límite de vibración).</p> <p>c) Controlar la temperatura de los rodamientos del ventilador en sala de control (revisar si ha saltado la alarma de límite de temperatura).</p>		
<u>Revisión parcial</u> ⁽¹⁾	<u>Frecuencia</u>	1 recarga
<p>a) Analizar la lubricación del ventilador (grasa) y del reductor (aceite).</p> <p>b) Lubricar (si es necesario) los rodamientos utilizando técnica ultrasónica.</p> <p>c) Lubricar reductor (si es necesario).</p> <p>d) Comprobar la alineación del eje con el acoplamiento.</p> <p>e) Inspeccionar fugas en zonas de sellos junto con limpieza.</p> <p>f) Inspeccionar el acoplamiento y comprobar el espesor del elastómero.</p> <p>g) Inspeccionar visualmente el estado de los álabes junto con limpieza.</p>		
<u>Revisión general</u> ⁽²⁾⁽³⁾	<u>Frecuencia</u>	2 recargas
<p>a) Inspeccionar visualmente el eje. Aplicar END en la zona de ajuste con los rodamientos.</p> <p>b) Inspeccionar visualmente los álabes junto con limpieza. Aplicar END en los álabes.</p> <p>c) Inspeccionar visualmente los engranajes del reductor. Aplicar END en engranajes.</p>		
<p>Nota 1: Se recomienda inspeccionar fugas de corriente y el estado de la puesta a tierra cuando se realice el mantenimiento del motor de baja tensión asociado. Con esto se consigue evitar el modo de fallo por erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes del rodamiento.</p> <p>Nota 2: Si el equipo queda parado por un intervalo de tiempo alto, girar manualmente de manera regular para evitar vibrocorrosión de los rodamientos.</p> <p>Nota 3: NDT: Ensayos no destructivos.</p> <p>*Si se observa cualquier anomalía durante el mantenimiento reemplazar el componente afectado.</p>		

Tareas de cambio de diseño

Las tareas de cambio de diseño tienen como objetivo aumentar la fiabilidad del equipo puesto que se encargarán de monitorizar los datos a tiempo real de la condición del equipo y a su vez, reducir las tareas de mantenimiento preventivo sistemático.

Cabe destacar que la Central Nuclear XX ya dispone de un software de mantenimiento el cual permitirá visualizar los datos obtenidos mediante la monitorización en continuo desde la sala de control.

La monitorización propuesta consigue eliminar la tarea de pruebas de operación que se realiza actualmente en la Central Nuclear XX cada 1 RE para el ventilador VTR08A.

- **Sensores de vibración**

La monitorización de la vibración de los rodamientos del ventilador y del reductor de velocidad se realizará mediante la normativa ISO 14694 *Industrial Fans – Specifications for balance quality and vibration levels* [33]. Tal y como se muestra en la ISO 14694, la localización propuesta para los sensores de vibración de los rodamientos será uno en posición axial por equipo, otro horizontal y vertical para cada rodamiento. Puesto que el ventilador dispone de dos rodamientos, se utilizará un total de 5 acelerómetros (2 sensores horizontales, 2 sensores verticales y 1 sensor axial).

A continuación, en la figura 11.1, se muestra la localización propuesta para los acelerómetros que monitorizarán en continuo el ventilador VTR08A.

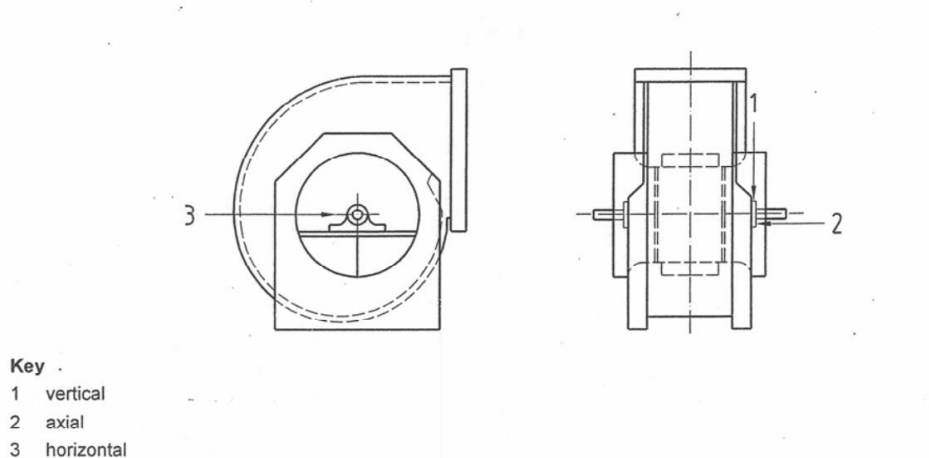


Figura 11.1. Localización de los acelerómetros que monitorizarán las vibraciones del ventilador VTR08A [33].

El reductor VTR08A dispone de dos rodamientos relevantes, uno a la salida del motor y otro a la entrada del ventilador, por lo que se utilizarán también 5 acelerómetros (2 sensores horizontales, 2 sensores verticales y un sensor axial).

- **Sensores de velocidad**

El sensor de velocidad irá instalado en el eje del ventilador y se encargará de medir variaciones de esta a durante la operación.

- **Sensores de temperatura**

Se utilizará un sensor de temperatura para cada rodamiento del ventilador VTR08A, un total de 2 sensores de resistencia de platino de 100 Ω a 0 $^{\circ}\text{C}$, conocidos comercialmente

como pt100. El sensor se instalará directamente en la boquilla de engrase de los rodamientos.

A continuación, en la figura 11.2, se muestra un ejemplo de instalación.

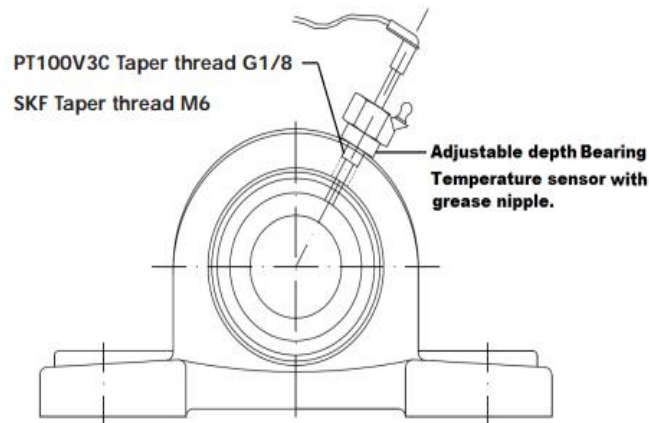


Figura 11.2. Ejemplo de instalación de los sensores de temperatura [34].

Rondas de operador

- En las rondas de operador que se realizarán cada turno, los operarios de mantenimiento deberán acudir a sala de control y observar los datos obtenidos mediante la monitorización en continuo de la vibración y la temperatura de los rodamientos, y la velocidad de rotación del ventilador. Se comprobará que dichas medidas se encuentren dentro los límites.
- Si se observa alguna anomalía, se actuará en consecuencia.

Tareas de revisión parcial

- Se cogerá una pequeña muestra de grasa de los rodamientos del ventilador y del aceite del reductor. Se analizarán en busca de deterioro o partículas que demuestren un desgaste de los elementos metálicos.
- Cuando el análisis de grasa y el equipo de ultrasonidos lo indique, se procederá a la re- lubricación de los rodamientos mediante técnica ultrasónica. El operario deberá ir introduciendo la grasa a los rodamientos hasta que el espectro de ultrasonido sea el adecuado. Para realizar esta labor, se deberá extraer el sensor de temperatura que se localiza en la boquilla de grasa de los rodamientos.
- Cuando el análisis de aceite del reductor lo indique, se vaciará el aceite del reductor y procederá su llenado.
- Se prestará especial atención a la alineación entre el eje del reductor y el eje del ventilador. Para ello se medirá la alineación en el acoplamiento la cual deberá estar dentro de los rangos expuestos por el fabricante.
- Se inspeccionará si hay evidencia de fugas de grasa o de aceite en los rodamientos del ventilador y el reductor. Se prestará especial atención en la zona de sellado. Se realizará una limpieza superficial de estas zonas.

- Utilizando el manual del fabricante del acoplamiento, se medirá el espesor del elastómero y se comparará con el valor recomendado. Si es necesario, se reemplazará el elastómero.
- Se realizará una inspección visual del estado de los álabes en busca de evidencias de deterioro o desgaste y se limpiará la zona del rodete.
- Si se observa alguna anomalía durante la revisión parcial, se actuará en consecuencia. Se dejará reflejado en las ordenas de trabajo de mantenimiento lo observado durante esta revisión.

Tareas de revisión general

- Se desmontará el ventilador y se inspeccionará visualmente el estado del eje y de los álabes. Se aplicarán ensayos no destructivos de líquidos penetrantes en la superficie del eje y de los álabes.
- Para desmontar el ventilador, seguir los pasos recomendados por el fabricante.
- Se desmontará el reductor de velocidad y se observará el estado de los engranajes. Se aplicará también un ensayo no destructivo en ellos en busca de deterioro.
- Para desmontar el reductor, seguir los pasos recomendados por el fabricante.
- Si se observa alguna anomalía durante la revisión general, se actuará en consecuencia. Dejar reflejado en las ordenas de trabajo de mantenimiento lo observado durante esta revisión.
- Si durante la revisión general, el ventilador queda parado por un intervalo de tiempo elevado, el personal de mantenimiento deberá girar manualmente el rodete del ventilador para evitar posible vibrocorrosión en los rodamientos.
- Se recomienda que, durante la revisión general, se inspeccione también posibles fugas de corriente que procedan del motor de baja tensión asociado, así como una inspección del correcto estado de la puesta a tierra del motor. Esto permitirá disminuir la probabilidad de aparición de erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes de los rodamientos y los engranajes del sistema VTR08A.

11.2. Plan de mantenimiento propuesto para el ventilador VTC02A

VTC02A	
Descripción del plan de mantenimiento	
<p>Con este plan de mantenimiento se consigue mitigar las causas y los efectos del 80% de los modos de fallos estudiados por el análisis AMFEC presentado en el documento TFM_Boulanouar Al Massati_Samir.</p> <p>Las instrucciones para realizar las tareas del plan de mantenimiento se encuentran en dicho documento.</p>	
Alcance del plan de mantenimiento	
Ventilador VTC02A	
Tareas de cambio de diseño	
<p>a) Monitorizar rodamientos del ventilador mediante sensores de vibración.</p> <p>b) Monitorizar eje del ventilador mediante sensores de velocidad de rotación.</p> <p>c) Monitorizar alineamiento entre la polea del ventilador y la del motor de baja tensión asociado.</p> <p>d) Monitorizar rodamientos del ventilador mediante sensores de temperatura.</p>	
Tareas de mantenimiento preventivo sistemático	
<u>Ronda de operador</u>	<u>Frecuencia</u> 1 turno
<p>a) Rondas de operador en busca de fugas, vibraciones y ruidos extraños. Comprobar, también, alarmas que provengan de los sensores de vibración, temperatura y velocidad del ventilador.</p>	
<u>Revisión parcial</u> ⁽¹⁾	<u>Frecuencia</u> 12 meses
<p>a) Analizar la lubricación de rodamientos (grasa).</p> <p>b) Lubricar (si es necesario) los rodamientos utilizando técnica ultrasónica.</p> <p>c) Comprobar paralelismo entre el eje del ventilador y el eje del motor de baja tensión.</p> <p>d) Inspeccionar fugas en zonas de sellos junto con limpieza.</p> <p>e) Inspeccionar visualmente el estado de los álabes junto con limpieza.</p> <p>f) Comprobar el correcto estado físico del sistema poleas/correas, alineamiento y tensado de correas.</p>	
<u>Revisión general</u> ⁽²⁾⁽³⁾	<u>Frecuencia</u> 24 meses
<p>a) Inspección visual del eje. Aplicar END en la zona de ajuste con los rodamientos.</p> <p>b) Inspección visual de álabes junto con limpieza. Aplicar END en los álabes.</p>	
<p>Nota 1: Se recomienda inspeccionar fugas de corriente y el estado de la puesta a tierra cuando se realice el mantenimiento del motor de baja tensión asociado. Con esto se consigue evitar el modo de fallo por erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes del rodamiento.</p> <p>Nota 2: Si el equipo queda parado por un intervalo de tiempo alto, girar manualmente de manera regular para evitar vibrocorrosión de los rodamientos.</p> <p>Nota 3: NDT: Ensayos no destructivos.</p> <p>*Si se observa cualquier anomalía durante el mantenimiento reemplazar el componente afectado.</p>	

Tareas de cambio de diseño

Las tareas de cambio de diseño tienen como objetivo aumentar la fiabilidad del equipo puesto que se encargarán de monitorizar los datos a tiempo real de la condición del equipo y a su vez, reducir las tareas de mantenimiento preventivo sistemático.

Cabe destacar que la Central Nuclear XX ya dispone de un software de mantenimiento el cual permitirá revisar los datos obtenidos mediante la monitorización en continuo desde la sala de control.

La monitorización propuesta consigue eliminar la tarea de pruebas de operación que se realiza actualmente en la Central Nuclear XX cada 18 meses para el ventilador VTC02A.

Sensores de vibración

Se realizará la misma instalación expuesta en apartado anterior respecto a los sensores de vibración con la diferencia de que solo hará falta instalar acelerómetros en los rodamientos del ventilador puesto que este no dispone de reductor de velocidad.

Sensores de velocidad

Se realizará la misma instalación expuesta en apartado anterior respecto a los sensores de velocidad.

Sensores de alineamiento de las poleas

Mediante sensores de alineación de poleas se pretende reducir paradas inesperadas producidas por una incorrecta alineación de las poleas debido a que actualmente el alineamiento se realiza de manera manual y este acaba siendo impreciso.

Los sensores láser de alineamiento de poleas consiguen aumentar la vida útil de los rodamientos, incrementar la disponibilidad del ventilador, disminuir el desgaste de las poleas y correas, reducir el consumo de energía y rebajar los niveles de vibración y ruido [35].

A continuación, en la figura 11.3, se muestra un ejemplo de instalación.



Figura 11.3. Ejemplo de instalación de sensores laser de alineación de poleas [35].

Sensores de temperatura

Se realizará la misma instalación expuesta en apartado anterior respecto a los sensores de temperatura.

Rondas de operador

- En las rondas de operador, los operarios deberán acudir a la localización del ventilador VTC02A y deberán comprobar que no existan ruidos y vibraciones anormales. También deberán cerciorarse de que no hay evidencias de fuga de grasa de los rodamientos.
- Los sensores que hay instalados en los rodamientos del ventilador, emitirán una señal en continuo a sala de control, lo operarios deberán comprobar que las mediciones están dentro de los rangos de buen funcionamiento.
- Si se observa alguna anomalía, se actuará en consecuencia.

Tareas de revisión parcial

- Se cogerá una pequeña muestra de grasa de los rodamientos del ventilador y se analizará en busca de deterioro o partículas que demuestren un desgaste de los elementos metálicos.
- Cuando el análisis de grasa y el equipo de ultrasonidos lo indique, se procederá a la re- lubricación de los rodamientos mediante técnica ultrasónica. El operario deberá ir introduciendo la grasa a los rodamientos hasta que el espectro de ultrasonido sea el adecuado. Para realizar esta labor, se deberá extraer el sensor de temperatura que se localiza en la boquilla de grasa de los rodamientos.
- Se comprobará el paralelismo entre el eje del ventilador y el eje del motor de baja tensión asociado haciendo uso del alineador por sensor laser de poleas instalado.
- Se inspeccionará si hay evidencia de fugas de grasa en los rodamientos del ventilador. Se prestará especial atención en la zona de sellado. Se realizará una limpieza superficial de estas zonas.
- Se realizará una inspección visual del estado de los álabes en busca de evidencias de deterioro o desgaste y se limpiará la zona del rodete.
- Se comprobará el correcto estado de la correa junto con el tensado de la misma si es necesario. Se comprobará el correcto estado de las poleas junto con la alienación mediante el sensor laser de alineamiento de poleas instalado.
- Si se observa alguna anomalía durante la revisión parcial, se actuará en consecuencia. Dejar reflejado en las ordenas de trabajo de mantenimiento lo observado durante esta revisión.

Tareas de revisión general

- Se desmontará el ventilador y se inspeccionará visualmente el estado del eje y de los álabes. Se aplicarán ensayos no destructivos de líquidos penetrantes en la superficie del eje y de los álabes.
- Para desmontar el ventilador, seguir los pasos recomendados por el fabricante.
- Si se observa alguna anomalía durante la revisión general, se actuará en consecuencia. Dejar reflejado en las ordenas de trabajo de mantenimiento lo observado durante esta revisión.
- Si durante la revisión general, el ventilador queda parado por un intervalo de tiempo elevado, el personal de mantenimiento deberá girar manualmente el rodete ventilar para evitar posible vibrocorrosión en los rodamientos.
- Se recomienda que, durante la revisión general, se inspeccione también posibles fugas de corriente que procedan del motor de baja tensión asociado, así como

una inspección del correcto estado de la puesta a tierra del motor. Esto permitirá disminuir la probabilidad de aparición de erosión eléctrica en la pista y elementos rodantes de los rodamientos del ventilador.

12. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico no será un factor completamente decisivo puesto que se prioriza el aumentar la fiabilidad de los equipos frente al coste, pero este ayudará a complementar la toma de decisiones respecto al reemplazo del mantenimiento actual con el propuesto.

Se realizarán dos análisis económicos, uno enfocado a la inversión de la monitorización y otro en comparar el mantenimiento propuesto frente al mantenimiento actual en la Central Nuclear XX.

12.1. Análisis de inversión sobre la monitorización

El cambio de diseño es el que se muestra en el apartado 11.2 para el ventilador VTC02A y el apartado 11.1 para el sistema VTR08A. A continuación, la tabla 12.1 y 12.2, se muestra un cuadro resumen con el coste total de la inversión.

Los precios se obtienen de la página web del distribuidor *Acorn industrial service* [II]

Tabla 12.1. Total de la inversión del ventilador VTC02A.

Instalación	Unidades	Precio unidad (€/u)	Precio total (€)
Sensores de vibración en rodamientos del ventilador	5	330	1650
Sensores de temperatura en rodamientos del ventilador	2	410	820
Alineador entre poleas	1	1017	1017
Sensores de velocidad del eje del ventilador	1	650	650
		Total (€)	4137

Tabla 12.2. Total de la inversión del sistema VTR08A.

Instalación	Unidades	Precio unidad (€/u)	Precio total (€)
Sensores de vibración en rodamientos del ventilador	5	330	1650
Sensores de temperatura en rodamientos del ventilador	2	410	820
Sensores de vibración en los rodamientos del reductor	5	330	1650
Sensores de velocidad del eje del ventilador	1	650	650
		Total (€)	4770

Para determinar la viabilidad y rentabilidad de la inversión del cambio de diseño propuesto, se realiza un análisis del valor actual neto (VAN). Si se obtiene un valor positivo del VAN, se confirma viabilidad y rentabilidad del proyecto de inversión, mientras que un valor negativo indicaría lo contrario.

A continuación, se muestra la expresión utilizada para el cálculo del VAN, ecuación 12.1.

$$VAN = -D_0 + \frac{FC_1}{(1+k)^1} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \frac{FC_3}{(1+k)^3} + \dots + \frac{FC_i}{(1+k)^i} + \dots + \frac{FC_n}{(1+k)^n} \quad (12.1)$$

Donde:

D_0 = Desembolso inicial en la inversión.

FC_i = Flujo de caja del periodo i.

n = Duración de la inversión.

k = Tasa de actualización.

Para el flujo caja se ha tenido en cuenta el total de horas/hombre (H/H) del personal de mantenimiento ahorrado al no realizar las tareas de mantenimiento preventivo que se cubre con la monitorización y los costes administrativos respectivos a estas tareas.

De manera interna se ha obtenido un valor aproximado sobre el coste de las horas/hombre (H/H) del personal de mantenimiento de la Central Nuclear XX y los costes administrativos por tarea, 90 €/(H/H) y 400 €/(tarea) respectivamente.

El total de horas/hombre realizadas para las tareas de mantenimiento preventivo que serán cubiertas por la monitorización, se ha obtenido mediante órdenes de trabajo de carácter preventivo de estas tareas de los últimos años.

Para la tasa de actualización se ha tomado un valor constante del 2%.

El tiempo de duración de la inversión se ha escogido 13,5 años que es cuando se prevé el cierre operativo de la Central Nuclear XX para pasar al proceso de desmantelamiento.

A continuación, en la tabla 12.3 y 12.4, se muestra el análisis VAN para el ventilador VTC02A y el sistema VTR08A respectivamente.

Tabla 12.3. Análisis VAN para la inversión en el ventilador VTC02A

VAN (13,5 años) ventilador VTC02A									
Años	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5
Meses	18	36	54	72	90	108	126	144	162
Tasa (2%)	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
H/H tarea	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Coste tarea	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Costes administrativos	400	400	400	400	400	400	400	400	400
VAN	5978								

Tabla 12.4. Análisis VAN para la inversión en el sistema VTR08A

VAN (13,5 años) sistema VTR08A									
Años	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5
Meses	18	36	54	72	90	108	126	144	162
interés (2%)	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
H/H tarea	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Coste tarea	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Costes administrativos	400	400	400	400	400	400	400	400	400
VAN	5345								

Como se observa en la tabla 12.3 y 12.4, se obtiene un VAN>0 en las dos inversiones de cambio de diseño por lo que consigue viabilidad y rentabilidad en ambas al cabo de los 13,5 años de operabilidad restante de la central.

12.2. Coste-beneficio del mantenimiento propuesto

Para obtener el análisis de coste beneficio, se ha comparado los costes en el mantenimiento propuesto frente al mantenimiento que existe actualmente en la Central Nuclear XX.

Para realizar el análisis se ha hecho uso de la herramienta proporcionada por el *Electric Power Research Institute (EPRI)*, entidad dedicada a la investigación y desarrollo tecnológico en todas las áreas de energía eléctrica, en su documento sobre *Cost Benefit Analysis for Maintenance Optimization Change* [36]. La fórmula que describe la herramienta se muestra a continuación, formula 12.2.

$$\text{Coste tarea (€)} = (CM + RP) \cdot FF + (PM + RP) \cdot FP + \frac{NRC}{RL} \quad (12.2)$$

Donde:

Coste tarea (€) = Coste de una determinada tarea de mantenimiento.

CM (€) = Costes de mantenimiento correctivo cuando se produce el fallo.

RP (€) = Costes de pérdida de energía debido a la desconexión por mantenimiento preventivo o correctivo.

FF (fallos/año) = Tasa de fallos esperada por año (un valor para el mantenimiento existente y otro para el mantenimiento propuesto).

PM (€) = Costes de mantenimiento preventivo de cada tarea.

FP (años) = Frecuencia de mantenimiento preventivo por año.

NRC (€) = Costes únicos y no recurrentes de la aplicación del plan de mantenimiento propuesto.

RL (€) = Vidal útil restante (prevista) de la planta.

Para la realización de este análisis se han tomado las siguientes consideraciones:

- Para el valor de CM se ha optado por el coste aproximado de llevar a fallo uno de los componentes estudiados en este proyecto, en concreto el que supondría un mayor coste.
En el CM interviene el coste de reemplazo más el coste de horas/hombre para realizar la tarea de mantenimiento correctivo.
- Para el valor de RP se considera 0 puesto que para realizar las tareas de mantenimiento propuestas no se genera ningún coste adicional por pérdida de energía.
El ventilador VTC02A tiene dos trenes, el Beta y el Charlie, que se pondrían en marcha a lo hora de realizar el mantenimiento preventivo o correctivo del tren Alpha.
Para el ventilador VTR08A, todo el mantenimiento preventivo que se le realice, la central se encontrará parada debido a la recarga de combustible puesto que este se encuentra dentro del edificio de contención. Por otra parte, si se tuviese que realizar alguna tarea de mantenimiento correctivo durante operación normal, se esperaría a realizarlo en recarga puesto que la función requerida por el ventilador se encontraría salvaguardada por sus otros trenes (Beta y Charlie).
- Para el valor de FF del mantenimiento actual, se ha cogido la obtenida por Weibull para próximo el año. El valor de FF para el mantenimiento propuesto se ha considerado su reducción en un 80% para el próximo año, debido a que con plan propuesto se cubre el 80% de los fallos del ventilador.
- Para el valor de PM se han utilizado las horas hombres del personal de mantenimiento necesarias según las ordenes de trabajo de carácter preventivo de los últimos años.
- El valor de NRC se ha obtenido mediante las horas aproximadas para realizar este proyecto a coste de 10 €/h.
- El valor de RL es de 13,5 años, que es cuando se prevé el cierre de operativo de la Central Nuclear XX.

A continuación, la tabla 12.5 y 12.6, se muestra el coste del mantenimiento actual para el ventilador VTC02A y el sistema VTR08A. Se ha considerado un coste de 90€/h del personal de mantenimiento de la Central Nuclear XX.

Tabla 12.5. Coste del mantenimiento actual para el ventilador VTC02A.

Tareas actuales para VTC02A	H/H	€/h
Revisión parcial	18	1620
Pruebas de operación	10	900
Revisiones eléctricas	8	720
Total (€)	36	3240

Para poder comparar el plan de mantenimiento actual para el ventilador VTC02A frente al propuesto, se ha tenido en cuenta que las pruebas de operación y las revisiones eléctricas actuales forman parte de la revisión parcial de VTC02A ya que se realizan a la misma frecuencia. A partir de este momento, cuando se utilice el término de "revisión parcial" se referirá a la revisión parcial junto con la prueba de operación y las revisiones eléctricas.

Tabla 12.6. Coste del mantenimiento actual para el sistema VTR08A

Tareas actuales para VTR08A	H/H	€/h
Revisión general	39	3510
Pruebas de operación	10	900
Revisiones eléctricas	8	720
Total (€)	57	5130

Igual que para el ventilador VTC02A, para poder comparar el plan de mantenimiento actual para sistema VTR08A frente al propuesto, se ha tenido en cuenta que las pruebas de operación y las revisiones eléctricas actuales forman parte de la revisión general de VTR08A ya que se realizan a la misma frecuencia. A partir de este momento, cuando se utilice el término de "revisión general" se referirá a la revisión general junto con la prueba de operación y las revisiones eléctricas.

A continuación, la tabla 12.7 y 12.8, se muestra el coste del mantenimiento propuesto para el ventilador VTC02A y el sistema VTR08A. Se ha considerado un coste de 90€/h del personal de mantenimiento de la Central Nuclear XX.

El significado de cada letra se encuentra en el apartado 11 donde se presenta el plan de mantenimiento propuesto.

Tabla 12.7. Coste del plan de mantenimiento propuesto del ventilador VTC02A.

Coste del plan de mantenimiento propuesto VTC02A		
Tareas revisión parcial	H/H	€
a)	1	90
b)	4	360
c)	1	90
d)	0,25	22,5
e)	2	180
f)	2	180
Total	10,25	923
Tareas revisión general		
a)	3,5	315
b)	3,5	315
Total	7	630

Tabla 12.8. Coste del plan de mantenimiento propuesto del sistema VTR08A.

Coste del plan de mantenimiento propuesto VTR08A		
Tareas revisión parcial	H/H	€
a)	2	180
b)	4	360
c)	1	90
d)	0,5	45
e)	0,25	22,5
f)	0,5	45
g)	2	180
Total	10,25	923

Coste del plan de mantenimiento propuesto VTR08A		
Tareas revisión general	H/H	€
a)	3,5	315
b)	3,5	315
c)	8	720
Total	15	1350

Una vez obtenido el coste del plan de mantenimiento actual y el coste del plan de mantenimiento propuesto, se procede a calcular mediante la ecuación 12.2, la diferencia de costes entre estos.

A continuación, en la tabla 12.9 se muestra la comparación económica entre la revisión general actual frente a la revisión general propuesta para el sistema VTR08A.

Tabla 12.9. Comparación económica entre la revisión general actual frente a la revisión general propuesta para el sistema VTR08A.

Parámetros	Revisión general actual	Revisión general propuesta
CM (€)	18000	18000
RP (€)	0	0
FF (fallos/año)	1,8E-05	3,6E-06
PM (€)	5130	1350
FP (años)	0,7	0,3
NRC (€)	0	2000
RL(años)	13,5	13,5
Total (€)	3420	598
Ahorro (€)		+ 2822

A continuación, en la tabla 12.10 se muestra la comparación económica entre la revisión parcial actual frente a la revisión parcial propuesta para el sistema VTR08A.

Tabla 12.10. Comparación económica entre la revisión general actual frente a la revisión general propuesta para del sistema VTR08A

Parámetros	Revisión parcial actual	Revisión parcial propuesta
CM (€)	18000	18000
RP (€)	0	0
FF (fallos/año)	1,8E-05	3,6E-06
PM (€)	0	923
FP (años)	0	0,7
NRC (€)	0	2000
RL(años)	13,5	13,5
Total (€)	0	763
Ahorro (€)		-763

Como se observa en la tabla 12.9 se consigue un ahorro de 2822 euros en la revisión general propuesta. Por lo contrario, al no realizarse revisión parcial actualmente para este ventilador, en la tabla 12.10 se observa que la Central Nuclear XX anualmente perdería un total de 763 euros por esta revisión. Sin embargo, en el cómputo global se

obtendría un ahorro anual de 2059 euros para el sistema VTR08A y 27799 euros llegados al cierre de la central.

Por otro lado, para el ventilador VTC02A se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 12.11. Comparación económica entre la revisión general actual frente a la revisión general propuesta para el ventilador VTC02A.

Parámetros	Revisión general actual	Revisión general propuesta
CM (€)	9000	9000
RP (€)	0	0
FF (fallos/año)	1,6E-05	3,1E-06
PM (€)	0	630
FP (años)	0	0,5
NRC (€)	0	2000
RL(años)	13,5	13,5
Total (€)	0	463
Ahorro (€)		-463

A continuación, en la tabla 12.12 se muestra la comparación económica entre la revisión parcial actual frente a la revisión parcial propuesta para el ventilador VTC02A.

Tabla 12.12. Comparación económica entre la revisión general actual frente a la revisión general propuesta para el ventilador VTC02A.

Parámetros	Revisión parcial actual	Revisión parcial propuesta
CM (€)	9000	9000
RP (€)	0	0
FF (fallos/año)	1,6E-05	3,1E-06
PM (€)	3240	923
FP (años)	0,7	1
NRC (€)	0	2000
RL(años)	13,5	13,5
Total (€)	2160	1071
Ahorro (€)		1089

Como se observa en la tabla 12.12 se consigue un ahorro de 1089 euros en la revisión parcial propuesta. Por lo contrario, al no realizarse revisión general actualmente para este ventilador, en la tabla 12.11 se observa que la central nuclear XX anualmente perdería un total de 463 euros por esta revisión. Sin embargo, en el cómputo global se obtendría un ahorro anual de 626 euros para el ventilador VTC02A y 8457 euros llegados al cierre de la central.

Los ahorros obtenidos a simple vista parecen irrisorios, pero hay que tener en cuenta que los resultados son solo para un ventilador. La central nuclear XX dispone de 145 ventiladores centrífugos de características similares por lo que el total de ahorro medio ascendería a aproximadamente 194709 euros anuales y 2628576 euros al cierre de la central.

13. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Con la ejecución de este proyecto se ha conseguido crear un plan de mantenimiento centrado en la fiabilidad de equipos con acciones preventivas (revisiones parciales y revisiones generales) y de cambio de diseño (mayoritariamente inversión en monitorización) enfocadas al mantenimiento basado en la condición, capaz de mitigar el 80% de los modos de fallo estudiados, es decir, el 80% de los fallos de los ventiladores y sus respectivos acoplamientos y reductores de velocidad. Este plan consigue reducir los tiempos de indisponibilidad del equipo, las horas/hombre al realizar las tareas y, por consiguiente, los costes destinados a personal de mantenimiento.

La fiabilidad de los ventiladores se verá considerablemente mejorada con la instalación de sistemas predictivos y basados en condición. Estos, permitirán detectar con anterioridad el modo de fallo y se dispondrá de más tiempo para poder planear que acciones de actuación son más adecuadas antes de que se produzca el fallo funcional.

Cabe destacar que para garantizar una mejora continua y cada vez más optimizada, lo óptimo, sería volver a realizar el análisis pasado un período de tiempo considerable desde su implantación, y observar así, si han aparecido nuevos modos de fallo no considerados y ver si se ha reducido el IPR con las acciones propuestas. Principalmente, lo que se espera es que disminuya el índice de ocurrencia.

Para lograr los objetivos del proyecto, para el sistema VTR08A, se ha tenido que añadir una tarea de revisión parcial, ya que no disponía de ella, con frecuencia de 1 RE (1 RE=18meses). Por otra parte, gracias a ello, se ha conseguido relajar la frecuencia de la revisión general de 1 RE a 2 RE, por lo que cada 2 RE se realizará una revisión muy completa ya que se efectuarán de manera conjunta la revisión general con la parcial.

Para el ventilador VTC02A la frecuencia de la revisión parcial se ha tenido que reajustar de 18 a 12 meses, debido a los resultados obtenidos sobre el tiempo medio entre fallos (MTBF), gracias al análisis de Weibull. Este ventilador no disponía de una revisión general, pero se ha considerado oportuno añadirla cada 24 meses para poder cubrir los modos de fallo más relevantes. De la misma forma que para el sistema VTR08A, se efectuará de manera conjunta una revisión general con una parcial cada 24 meses.

La inversión en la monitorización, aparte de aumentar la fiabilidad de los equipos, puesto que se tendrán controlados los datos a tiempo real de la condición del equipo, se ha concluido mediante el método del valor actual neto (VAN) que resultará rentable y viable la implantación de los sensores propuestos, debido a la eliminación de las tareas de prueba de operación en ambos ventiladores. Al analizarse los resultados obtenidos mediante el análisis VAN, se observa que se obtendría una recuperación de la inversión llegados al año de cierre operativo de la central de un 244% para el ventilador VTC02A y de un 212% para el sistema VTR08A.

Por último, a la hora de comparar el plan de mantenimiento que dispone la Central Nuclear XX actualmente frente al propuesto para el sistema VTR08A y el ventilador VTC02A, haciendo uso de la herramienta *Cost Benefit Analysis for Maintenance Optimization Change* [36], se han obtenido resultados muy satisfactorios. Teniendo en cuenta que la central dispone de 145 ventiladores de condiciones similares, con el plan de mantenimiento propuesto en este proyecto, se conseguiría un ahorro total llegados al *shutdown*, cierre operativo de la central nuclear XX (13,5 años), de 2.628.576 €.

14. NORMAS Y REFERENCIAS

- [1] A. Chalifoux, J. Baird, , «"Reliability Centered Maintenance (RCM) Guide", United States Army Construction Engineering Research Laboratory. Technical Report 99/41,» Abril 1999.
- [2] J. D. Andrews, T.R Moss, «"Reliability and Risk Assessment", 2a ed. London UK: Professional Engineering Publishing,» 2002.
- [3] UNE, «UNE-EN IEC 60812:2018. "Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE y AMFEC)".,» Noviembre 2018.
- [4] UNE, «UNE-EN 62740:2015. "Análisis de causa raíz (RCA)".».
- [5] «"Component Reliability Data For Use In Probabilistic Safety Assessment", IAEA International Atomic Energy Agency,» 1988.
- [6] «"Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE y AMFEC)", UNE-EN IEC 60812:2018,» Noviembre 2018.
- [7] J. Moubray, «(2a edición). (2004). Mantenimiento centrado en la fiabilidad. Aladon Ltd».
- [8] NASA, «"RCM GUIDE. Reliability-Centered Maintenance Guide. For facilities and collateral Equipment", NASA National Aeronautics and Space Administration,» Septiembre 2008.
- [9] «"Failure Mode And Effects Analysis (FMEA) For Classification", ABS American Bureau of Shipping,» Mayo 2015.
- [10] «"Equipment reliability process description", INPO AP-913 rev.4,» Octubre 2013.
- [11] «"Análisis de causa raíz (RCA)", UNE-EN 62740:2015,» Diciembre 2015.
- [12] «"Comité de Confiabilidad. Concepto de fiabilidad", AEC Asociación Española para la Calidad».
- [13] C. M. G. Londoño, M. A. V. Cuzco, S. R. V. Parra, «"Estudio de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad aplicado a grupos electrógenos prime", Ciencia digital vol. 3 no. 3 pp. 44-61,» Julio-septiembre 2020.
- [14] J. M. T. d. Pino, «"Fiabilidad: La distribución de Weibull", NTP 331,» 1994.
- [15] R. B. Abernethy, «"The New Weibull Handbook. Reliability & Statistical Analysis for predicting Life, Safety, Survivability, Risk, Cost and Warranty Claims"., 4a ed. Boston United Kingdom: British Library Document Supply Center (BLDSC),» 2001.
- [16] «"Asset Management - an anatomy", IAM. The institute of Asset Management,» Diciembre 2015.

- [17] «"Applications of Reliability Centered Maintenance to Optimize Operations and Maintenance in Nuclear Power Plants", IAEA. International Atomic Energy Agency,» Mayo 2007.
- [18] «"Rolling bearings – Damage and failures -Terms, characteristics and causes", ISO 15243:2004,» Febrero 2004.
- [19] «"Daño de rodamientos y análisis de fallas" SFK,» Febrero 2017.
- [20] «"Análisis de daños en los rodamientos TIMKEN y guía de referencia sobre lubricación", TIMKEN,» 2015.
- [21] «"Averías de los rodamientos", FAG Sales Europe GmbH - España».
- [22] «"Bearing Failure: Causes and Cures", Barden Precision Bearings».
- [23] «"Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment," NSWC Naval Surface Warfare Center Carderock Division,» Enero 2010..
- [24] H. P. Bloch, F.K. Geithner, «"Machinery Failure Analysis and Troubleshooting", vol 2. 3a ed. Houston Texas: Gulf Publishing Company,» 1999.
- [25] A. Hipni, J. S. H. Sitanggang, E. Rimawan, H. H. Purba, C. Jaqin., «"Analisis of Centrifugal Exhaust Fan Damage on Line Painting", International Journal of Innovative Science and research Technology, Vol. 4, no. 1 pp. 410-415,» Enero 2019.
- [26] «"POLI-NORM. Instrucciones de servicio de montaje de acoplamientos flexibles", KTR-Group,» Febrero 2017.
- [27] «"Radial shaft seals HMS5 and HMSA10", SFK,» Junio 2013.
- [28] «"Gears – Wear an damage to gear teeth -Terminology", ISO 10825:1995,» Agosto 1995.
- [29] «"Power Tansmission belts", SFK,» Abril 2016.
- [30] J. Hofman, «"Design Failure Mode Effect Analysis (FMEA) Report" European Union's Horizon 2020, no. informe EnFAIT-UE-0011,» Septiembre 2017.
- [31] S. P. Raut, L. P. Raut, «"A Review of Various Techniques Used for Shaft Failure Analysis", International Journal of Engineering Research and General Science", vol 2 no. 2, pp. 159-171,» Febrero 2014.
- [32] «"Ventiladores centrífugos, Advertencias e instrucciones de uso", FERRARI, Industrial fan technology,» Julio 2017.
- [33] «"Industrial fans - Specifications for balance quality and vibration levels", ISO 14694:2003,» Marzo 2003.
- [34] «"Adjustable PT100 Bearing Temperature Sensor with grease nipple", Muller beltex».

[35] «"Herramientas SFK de alineación para poleas y piñones, Serie TKBA", SFK,»
Octubre 2014.

[36] «"Cost Benefit Analysis for Maintenance Optimization Change", EPRI Electrical
Power Research Institute,» Diciembre 2006.

[37] «"Instrucción IS-32, sobre Especificaciones Técnicas de Funcionamiento en
centrales nucleares", CSN Consejo de Seguridad Nuclear,» Diciembre 2011.

[I] AEROVENT. Industrial Ventilation Systems (15/03/2022) <https://www.aerovent.com>

[II] Acorn Industrial Service (02/05/2022) <https://www.acorn-ind.co.uk/>