



## TRABAJO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

# Innovando desde la Gestión del mantenimiento. El Remantenimiento. Caso práctico Central Hidroeléctrica

## Innovating from Maintenance Management. Remaintenance. Case study: Hydroelectric Power Plant

Francisco Javier Martínez Monseco<sup>1,\*</sup>, Albert Planagumá Vilamitjana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doctorando en el programa de tecnologías industriales. ETSI UNED.  
Enel Green Power Hydro (España).

<sup>2</sup> ECOSIMTEC. La Celler de Ter - Girona (España).

\*Autor de correspondencia: [jmartinez1638@alumno.uned.es](mailto:jmartinez1638@alumno.uned.es)

Recibido: 4 de febrero de 2021

Aprobado: 2 de mayo de 2021

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional 

### RESUMEN/ABSTRACT

Las organizaciones que gestionan activos físicos, la figura del departamento de mantenimiento desarrolla su trabajo realizando una gestión de un presupuesto anual dedicado al mantenimiento y esperando que con mayor o menor fortuna no se produzca una avería grave y que la disponibilidad del activo sea la máxima. El artículo presenta un caso donde podemos identificar correctamente el estado del activo con herramientas de optimización del mantenimiento combinadas (amfe, análisis criticidad, análisis ciclo de vida y RCM) que pueden optimizar el presupuesto del mantenimiento (opex) pero que a la vez pueden servir como base de análisis de mejoras del activo (capex). Se define el "remantenimiento" como la combinación entre la optimización del mantenimiento y el rediseño del activo "reinventando" la función a cumplir por parte de los sistemas identificados como críticos en dicho análisis, y así poder justificar delante de la organización proyectos de mejora del activo como un incremento de ingresos del negocio y no simplemente como un gasto a tener que amortizar.

**Palabras clave:** Remantenimiento, Mantenimiento Centrado en Fiabilidad, RCM, Análisis de modos de fallo del Sistema, Centrales Hidroeléctricas, Gestión de activos físicos.

*In organizations that manage physical assets, the figure of the maintenance department carries out its work by managing an annual budget dedicated to maintenance and hoping that with greater or lesser luck there will not be a serious breakdown and that the availability of the asset is the maximum. The article presents a methodology where we can correctly identify the state of the asset with combined maintenance optimization tools (amfe, criticality analysis, life cycle analysis and RCM) that can optimize the maintenance budget and justify investments. "Remaintenance" is defined as the combination between the optimization of maintenance and the redesign of the asset "reinventing" the function to be fulfilled by the systems identified as critical in said analysis, and thus being able to justify before the organization projects to improve the asset as an increase in business income.*

**Keywords:** Refurbishment, Reliability Centered Maintenance, RCM, System Failure Mode Analysis, Hydroelectric Power Plants, Physical Asset Management.

### INTRODUCCION

Desde el departamento de mantenimiento de cualquier organización es fundamental tener información del estado de dicho activo en cada momento y poder planificar las correspondientes acciones para que cumpla la función requerida en cada momento.

Cómo citar este artículo:

Francisco Javier Martínez Monseco y Albert Planagumá Vilamitjana. Innovando desde la Gestión del mantenimiento. El Remantenimiento. Caso práctico Central Hidroeléctrica. 2021, vol. 42, n. 2, mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

Por ello no deberemos afrontar el reto del mantenimiento como una gestión anual de un presupuesto que cada vez es menor y que además implica priorizar en cuanto a las acciones a realizar, sin tener claramente justificada dicha justificación delante de la organización. Es fundamental, por lo tanto, emplear herramientas de optimización del mantenimiento donde podamos identificar claramente los problemas que tenemos que afrontar y así tener una base sólida para definir una estrategia justificada de acciones delante de la organización.

RCM (Reliability centered maintenance, mantenimiento centrado en fiabilidad) es un enfoque sistemático para determinar los requerimientos de mantenimiento de planta y equipo en su funcionamiento. Se utiliza para optimizar estrategias de mantenimiento preventivo (PM). Los programas desarrollados de PM minimizan los fallos del equipo y proporcionan a las plantas industriales de equipo eficaz. RCM es uno de los más conocidos y más utilizados dispositivos para preservar la eficiencia operativa del sistema industrial. Sus principios básicos fueron desarrollados en los años sesenta para la industria aeronáutica norteamericana. Su origen se debe a cuando las aerolíneas empezaron a darse cuenta que sus filosofías de mantenimiento no solamente eran demasiado caras sino también activamente peligrosas. Este planteamiento motivó que esta industria pusiera en marcha un conjunto de grupos de trabajo de mantenimiento con la misión de reexaminar todo lo que se hacía para mantener las aeronaves volando. Dichos grupos eran formados por representantes de los fabricantes de aviones, de las aerolíneas y de la FAA (“Federal Aviation Agency”).

La mayoría de estudios y estrategias actuales de optimización del mantenimiento se han basado en el RCM [1-3]. De hecho la base del RCM, que sería en análisis AMFE es una base sólida para conocer cualquier activo en la industria actual [4,5]. Como propuestas de investigación en ingeniería de mantenimiento mediante estudio de casos, se ha manifestado al tendencia de considerar la aplicación del análisis de modos de fallo de diferentes sistemas complejos que posteriormente se analizaban mediante RCM en base a la priorización de acciones valoradas mediante valoración cuantificada del riesgo [6 – 8]. Mediante el presente artículo se analiza un activo físico complejo con requerimientos de alta fiabilidad como es una central hidroeléctrica, teniendo en cuenta herramientas de optimización basadas en rcm, amfe y priorización por riesgo pero que no solo proponen acciones de optimización de costes en mantenimiento sino que también justifican nuevas soluciones para el propio activo, definiendo esta metodología como “remantenimiento”.

Se utiliza como caso práctico un sistema complejo como una central hidroeléctrica debido a que la energía hidroeléctrica es la tecnología de generación de energía renovable más madura, confiable y rentable disponible. La energía hidroeléctrica es la mayor fuente de energía renovable, y se considera que hasta el 2024 seguirá siendo la principal fuente renovable en el mundo. Su producción anual está por encima de los 4.000 Twh [9–10]. La energía hidroeléctrica es la fuente de energía más flexible en generación disponible y es capaz de responder a las fluctuaciones de la demanda en minutos, entregando energía de carga base. La generación de electricidad con minicentrales hidroeléctricas se desarrolló en la mayoría de los países en los inicios del siglo XX y en muchos casos no se han realizado demasiadas adecuaciones y mejoras intentando conseguir los máximos ingresos de generación eléctrica con los mínimos costes de explotación.

El estudio de optimización del mantenimiento y aplicación de mejoras tecnológicas en pequeñas centrales hidroeléctricas ofrece posibilidades de potencial desarrollo y crecimiento, debido a la diversidad de caudales que aún son susceptibles de ser aprovechados con las nuevas tecnologías.



**Fig. 1. Minicentral hidroeléctrica y azud de la central. (Fuente Endesa Generación-Enel Green Power Hydro).**

Las estrategias de optimización más útiles que podemos aplicar de manera combinada en el día a día de la gestión de mantenimiento son:

- Análisis modos de fallo y efectos de los sistemas del activo físico
- Análisis del ciclo de vida de los sistemas del activo físico

- Análisis de riesgos y priorización.
- Mantenimiento centrado en fiabilidad (RCM)

## **METODO DE ANALISIS DE INVESTIGACION**

A continuación se definen las diferentes estrategias utilizadas en la base de optimización del mantenimiento y explotación de una central hidroeléctrica. Posteriormente se presenta la base de análisis en cuanto a modos de fallo de la central hidroeléctrica así como su priorización en base al riesgo. Finalmente se plantean las diferentes opciones de optimización del mantenimiento desde el punto de vista de optimización, así como la propuesta de “remantenimiento” para justificar el rediseño del activo físico (central).

### **Análisis de modos de fallos y efectos**

El Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) se encarga de analizar los posibles riesgos de fallo en productos y procesos. El enfoque es metodológico, se basa en diagramas de causa y efecto, criterios de evaluación, etc. El AMFE proporciona las herramientas para el análisis de riesgo en productos o procesos nuevos, modificaciones mayores en procesos o especificaciones, cambios mayores de ubicación de procesos funcionales [11]. En la actualidad existen varios standard de calidad para automoción, pero el más extendido de ellos es la norma “IATF 16949:2016”, [12], que fue desarrollada de forma conjunta por empresas del sector de la automoción.

### **Análisis ciclo de vida activo**

Todas las Empresas realizan acciones para trabajar con sus activos físicos y obtener beneficios de su confiabilidad. Lamentablemente, la experiencia indica que estas acciones y gestiones, en general, son aisladas y desordenadas, de manera tal que las Empresas no logran obtener un retorno máximo de sus activos. De esta manera, en lugar de pensar en la necesidad de “reducción de costos de mantenimiento de un activo”, una visión a mediano y largo plazo obliga a pensar en la maximización del Beneficio de Ciclo de Vida de un Activo, el cual surgirá de la diferencia entre los Ingresos del Ciclo de Vida y el Costo del Ciclo de Vida. Para conseguir este objetivo, lo primero es cambiar el concepto de cómo analizar al mantenimiento y como ubicarlo en el contexto de las demás funciones empresariales. Todas las funciones existen pues aportan algo al resultado, sino no existirían, y si estamos hablando de empresas industriales, comerciales y de servicios ese resultado es el lucro en el negocio en que ella se encuentra. Para una organización, adoptar aquellas acciones que se consideren apropiadas durante el ciclo de vida de dichos activos para lograr el balance óptimo entre su coste de ciclo de vida, riesgo y desempeño (gestión del riesgo durante el ciclo de vida) es fundamental.

### **Análisis criticidad**

La base del análisis de criticidad se desarrolla calculando el número de prioridad de riesgo (NPR) mediante la fórmula:

$$\text{NPR} = \text{severidad} \times \text{ocurrencia} \times \text{detección.}$$

El valor obtenido estará entre 1000 y 1. Se puede establecer un valor máximo de NPR a partir del cual se debe de adoptar acciones de mejora, con objeto de reducir el valor de NPR. Una vez realizado el análisis NPR, ya tendremos la priorización de sistemas donde será necesario definir acciones. La definición de los 3 índices que constituyen el NPR es la siguiente:

- **Índice de severidad (basado en la seguridad, medio ambiente, producción y coste, valoración 1-10).**

La severidad es el valor asociado con el más severo efecto para un modo de fallo en concreto.

- **Índice de ocurrencia (valoración 1-10).**

Mediante el índice de ocurrencia debemos valorar la probabilidad de que se manifieste la causa que producirá el modo de fallo en el proceso.

- **Índice de detección (valoración 1-10).**

La detección es la valoración de la probabilidad de que los controles detecten la aparición del modo de fallo o su causa.

### **Mantenimiento Centrado en Confiabilidad**

Según la Norma UNE 60300, El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM) es un método para identificar y seleccionar aquellas políticas de gestión de fallos que contribuyan a alcanzar de manera eficaz y eficiente los niveles requeridos de seguridad, disponibilidad y coste de explotación. El RCM proporciona un proceso de decisión para identificar los requisitos, o actividades de gestión, de un mantenimiento preventivo aplicable y eficaz de los equipos de una instalación [13], teniendo en cuenta las consecuencias operativas, económicas y de seguridad que pudieran derivarse de fallos identificables y de los mecanismos de degradación responsables de aquellos fallos [14].

El resultado final de la aplicación de dicho proceso es el planteamiento de la conveniencia de realizar una tarea de mantenimiento, un cambio de diseño o cualquier otra alternativa que dé lugar a una mejora. La aplicación satisfactoria del RCM requiere un buen conocimiento de los equipos y las estructuras, el entorno operativo, el contexto operacional y los sistemas asociados, así como de los fallos potenciales y sus consecuencias. El RCM puede aplicarse a multitud de sistemas, tales como un tren, un barco, un avión, una central eléctrica, o cualquier otro sistema que esté constituido por subsistemas eléctricos, mecánicos o de instrumentación y control. En la figura 2, se reflejan las diferentes etapas o pasos a implementar en la estrategia RCM [15]. Mediante el análisis secuencia de cada uno de los capítulos indicados, se desarrolla toda la información que tenemos del sistema industrial, para poder tener las herramientas necesarias de decisión en cualquier estrategia o definición de rediseños a implementar.

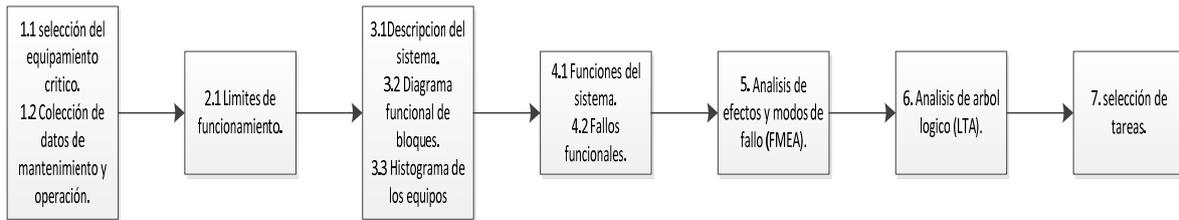


Fig.2. Principales pasos del RCM. [15].

### Bases de análisis para la optimización en la gestión del activo físico desde el mantenimiento

En la mayoría de las organizaciones el mantenimiento es visto como un departamento que solo aporta costes en el negocio y su objetivo es reducir costes. El objetivo del artículo es explicar una propuesta para que el departamento de mantenimiento aporte valor al negocio, y constituya un centro de beneficios. Incremento del beneficio implica mayores ingresos y menores costes (optimización del mantenimiento).

- Las bases de análisis del mantenimiento hoy en día se basan en:
- Entorno global más competitivo.
- Necesidad de generar la posibilidad de incrementar la producción (mayor mercado).
- Instalación industrial
- Mejora continua/rentabilidad. Necesidad de reducción de márgenes (mayor competencia).
- Qué se analiza
- Fallos de los equipos (modos y causas)
- Fiabilidad
- Consecuencias de los fallos
- Acciones para evitar la aparición de los fallos.

### Análisis operación y mantenimiento centrales hidroeléctricas. Sistemas y modos de fallo críticos y estrategias de optimización del mantenimiento

Uno de los aspectos más importantes en la aplicación de la estrategia de mantenimiento de una central hidroeléctrica es poder dividir el activo físico en una serie de sistemas definidos por una agrupación de funciones a cumplir en el funcionamiento normal. Se define en la figura 3, los diferentes sistemas y equipos que componen cada sistema en una central hidroeléctrica.

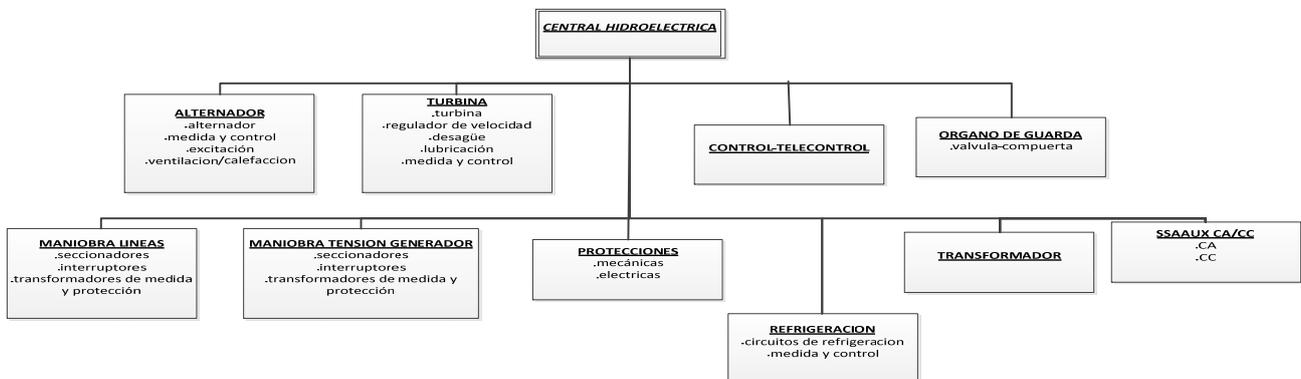


Fig. 3 Sistemas y equipos que componen cada sistema de una central hidroeléctrica.[16].

### Características del universo de centrales hidroeléctricas analizada

Como punto de partida de la optimización del mantenimiento de las centrales hidroeléctricas mediante las herramientas que hemos considerado (AMFE, análisis criticidad y priorización, análisis del ciclo de vida y mantenimiento centrado en fiabilidad), se ha considerado una base de datos de averías e incidencias en un universo de centrales hidroeléctricas en España de la empresa Enel Green Power. 109 centrales hidroeléctricas, 203 grupos hidroeléctricos

- Horas de funcionamiento medio año por grupo 6.739 hrs
- Índice de funcionamiento anual por grupo 79%
- Número de incidencias analizadas en el periodo 2009-2019: 1.303 incidencias.
- Duración media incidencia 12 hrs
- Severidad media incidencias 5,3
- Ocurrencia media incidencias 5,8
- Detección media incidencias 6,4
- NPRmediaincidencias: 191.

### Análisis de fallos y averías de los sistemas de las centrales hidroeléctricas

En base al análisis indicado, en la figura 4, se refleja la división de las incidencias por sistemas de las centrales hidroeléctricas.

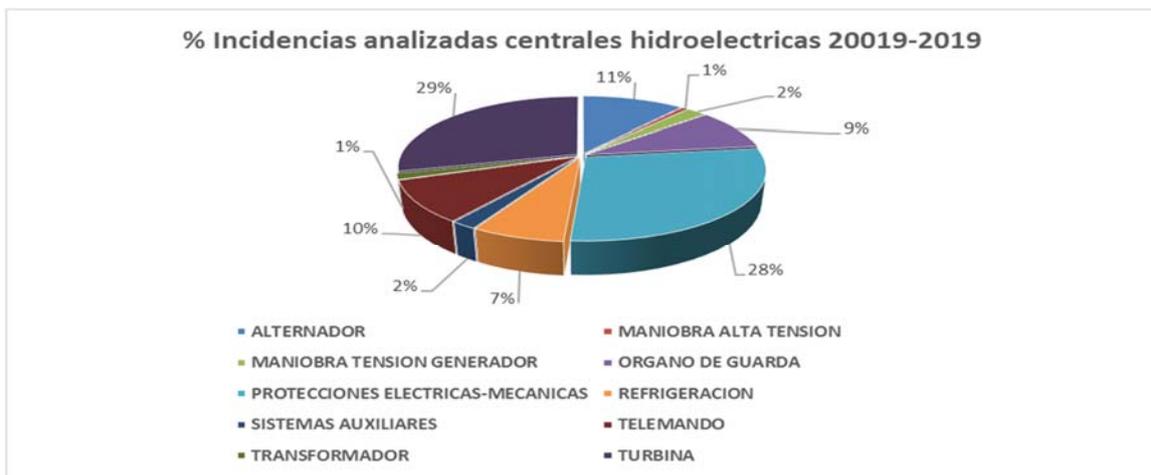


Fig. 4. Análisis incidencias en centrales hidroeléctricas analizadas en el periodo 2009-2019. [17].

Para la realización del análisis de incidencias se ha definido la tipología de mecanismos de fallo y modos de fallo reflejados en la norma ISO 14224 Y UNE 13306 (tablas 1, 2 y 3). El Modo de fallo es el efecto observable por el que se constata el fallo del sistema. A cada fallo se le asocian diversos modos de fallo y cada modo de fallo se genera como consecuencia de una o varias causas de fallo; de manera que un modo de fallo representa el efecto por el que se manifiesta la causa de fallo.

**Tabla 1 Mecanismos de fallos según ISO 14224.[18].**

<b>Mecanismo de fallo</b>	<b>Tipo mecanismo fallo</b>	<b>Descripción del mecanismo de fallo</b>
<b>Fallo mecánico. MEC</b>	General	Fallo mecánico sin detalles específicos
	Fuga	Fuga externa que provoca fallo mecánico
	Vibración	vibración anormal
	Fallo holgura alineación	fallo causado por holgura y desalineación
	Deformación	Deformación de equipo
	Afloje	Desconexión
	Desinserción	Atasco debido a desinserción de material
<b>Fallo material. MAT</b>	General	Fallo debido a material sin detalles específicos
	Cavitación	Relevante para equipos como válvulas, turbinas y bombas
	Corrosión	Corrosión electromecánica o química
	Erosión	Desgaste erosivo
	Desinserción	Desgaste abrasivo y erosivo
	Rotura	Fractura
	Fatiga	Si la causa de rotura es la fatiga
	Explosión	Material dañado por quema o sobrecalentamiento
<b>Fallo instrumentación. INS</b>	General	Fallo de instrumentación sin detalles específicos
	Fallo control	Sin control o regulación
	Sin señal/ indicación	Sin señal
	Falta señal alarma	Señal equivocada
	Desajuste	Error de calibración o parámetro equivocado
	Error software	fallo por error de software de control
	Causa común /modo de fallo común	fallo de instrumentación simultáneos
<b>Fallo eléctrico. ELE</b>	General	Fallos de alimentación o conexión pero sin detalles específicos
	Cortocircuito	Cortocircuito
	Circuito abierto	Desconexión, interrupción o rotura de cable o conexión
	Sin alimentación	Perdida de alimentación eléctrica
	Defecto alimentación	Fallo de alimentación eléctrica
	Fallo aislamiento	Fallo a tierra o baja impedancia de aislamiento
<b>Influencia externa. EXT</b>	General	Fallo causado por eventos externos sin detalles específicos
	Bloqueo	Flujo restringido o bloqueado debido a contaminación en circuitos
	Contaminación	Contaminación de los fluidos de lubricación
	Otras influencias comunes	Objetos extraños con influencia en los sistemas
<b>Otros. MIS</b>	General	Mecanismo de fallos sin listar
	Sin causa encontrada	Fallos investigados por causa no revelada o incierta
	Causas combinadas	Causas combinadas
	Otras	Texto libre
	Desconocido	Sin información

**Tabla 2. Modos de fallo y tipos de fallo según ISO 14224.**

<u>MODO DE FALLA</u>	<u>MECANISMOS FALLOS (ISO 14224)</u>	<u>TIPO DE FALLA</u>
DESARME	EXT	ACTUACION PROTECCIONES ELECTRICAS GRUPO
		ACTUACION PROTECCIONES MECANICAS GRUPO
		ACTUACION NIVEL DE CAMARA CARGA-CANAL
		BLOQUEO SINCRONIZACION GRUPO
		FALTA CONDICIONES DE FCTO GRUPO
		TAPONAMIENTO REJAS
SOBRECAPACIDAD		PROTECCIONES ELECTRICAS EXTERNAS
		RIADAS
		FALTA CAUDAL DE AGUA
CONTROL GRUPO	INS	FALTA COMUNICACIONES
		FALTA TELECONTROL
		FALLO AUTOMATISMO DE FUNCIONAMIENTO
OBRA CIVIL	MAT	ROTURA TUBERIA
		ROTURA CANAL
		ROTURA VALVULA
		ROTURA COMPUERTA
		GRIETAS ASENTAMIENTOS
		FUGAS AGUA TUBERIAS
		GRIETAS EQUIPOS MECANICOS
DETERIORO FISICO	MAT	OXIDACIONES
		AGARROTAMIENTOS ELEMENTOS MECANICOS
		MAL FUNCIONAMIENTO ELECTROMECANICO
DETERIORO ELECTRICO	ELE	DISPARO TEMPERATURAS
		FALTA CIRCULACION
		PERDIDA PARAMETROS REGULACION TURBINA
		PERDIDA PARAMETROS LUBRICACION
		PERDIDA PARAMETROS REFRIGERACION
		PERDIDA PARAMETROS ORGANO GUARDA
		PERDIDA PARAMETROS TRANSFORMACION
		PERDIDA PARAMETROS MANIOBRA
		DISPARO MAGNETOTERMICOS CA-CC
		FALLOS INTERRUPTORES AT
		PROBLEMAS ELECTRICOS TT/TI MEDIDA Y PROTECCION
		ACCIONAMIENTOS ELECTRICOS
		PERDIDA PARAMETROS REGULACION TENSION
DETERIORO MECANICO	MEC	DISPARO TEMPERATURAS
		FALTA CIRCULACION
		PERDIDA PARAMETROS REGULACION TURBINA
		PERDIDA PARAMETROS LUBRICACION
		PERDIDA PARAMETROS REFRIGERACION
		PERDIDA PARAMETROS ORGANO GUARDA
		PERDIDA PARAMETROS TRANSFORMACION

Continuación Tabla 2. Modos de fallo y tipos de fallo según ISO 14224.		
		PERDIDA PARAMETROS MANIOBRA
		PROBLEMAS FILTROS
		DETECCIONES VELOCIDAD
		ROTURAS EQUIPOS MECANICOS (BIELETAS...)
		FALLO VALVULAS
		FALLO JUNTAS DE CARBONES
		PERDIDA PARAMETROS REGULACION TENSION
FALLO MANTENIMIENTO	INS	PROBLEMAS EQUIPOS MEDICION
		PROBLEMAS EQUIPOS CONTROL
		ANOMALIAS DE PRONTA CORRECCION
		NIVELES BAJOS-ALTOS
		DISPAROS INTEMPESTIVOS EQUIPOS MEDICION-CONTROL
		DESAJUSTE PARAMETROS FUNCIONAMIENTO
		FALLO FINALES DE CARRERA
		FALLO CIRCULADORES-CAUDALIMETROS
FALLO HUMANO	MIS	DEVOLUCIONES DESCARGOS
		MODIFICACION FCTO NORMAL
		ACCIONES ERRONEAS CON INDISPONIBILIDAD

Tabla 3. Categorías de Mantenimiento según UNE-EN 13306.

GENERAL	ESPECIFICO	ACTIVIDAD	TIPO DE ACCION	DESCRIPCION
Correctivo	Urgente		Reparación. Diagnóstico de averías. Localización de averías	Mantenimiento correctivo que se ejecuta inmediatamente después de la detección de la avería.
	Diferido		Reparación. Diagnóstico de averías. Localización de averías	Mantenimiento correctivo que no se ejecuta inmediatamente tras la detección de la avería, sino que se pospone y programa.
Preventivo	Sistemático	Preventivo de restauración	Lubricaciones, limpiezas, ajustes, alineaciones, cargas, revisiones. Sustitución piezas de desgaste. Sustitución de equipos.	Mantenimiento preventivo realizado de acuerdo a unos intervalos de tiempo o unidades de uso establecidos, sin considerar la condición del elemento.
	Basado en condición	Inspecciones/monitorización	Sentidos humanos. Control parámetros del proceso, control funcionamiento, control calidad. Efectos dinámicos, químicos, físicos (END), temperatura, eléctricos. Monitorización del patrón de fallo, curva P-F	Mantenimiento preventivo realizado en función del estado de determinados parámetros de control de la degradación que se monitoriza.
	Legal			Mantenimiento preventivo realizado para el cumplimiento de la legislación vigente basado en el tiempo o unidades de función.
Modificativo		Rediseño		Acciones técnicas y de gestión para la implementación de mejoras en la realización de la función de un elemento o para cambiar dicha función

## RESULTADOS

### Priorización de las acciones a realizar sobre los sistemas críticos del activo físico.

En base al análisis de modos de fallo de las centrales hidroeléctricas, en la tabla 4, se listan una serie de modos de fallo críticos que constituyen la base de priorización de actuación debido al riesgo detectado de producirse.

**Tabla 4. Aplicación propuesta de optimización mantenimiento.**

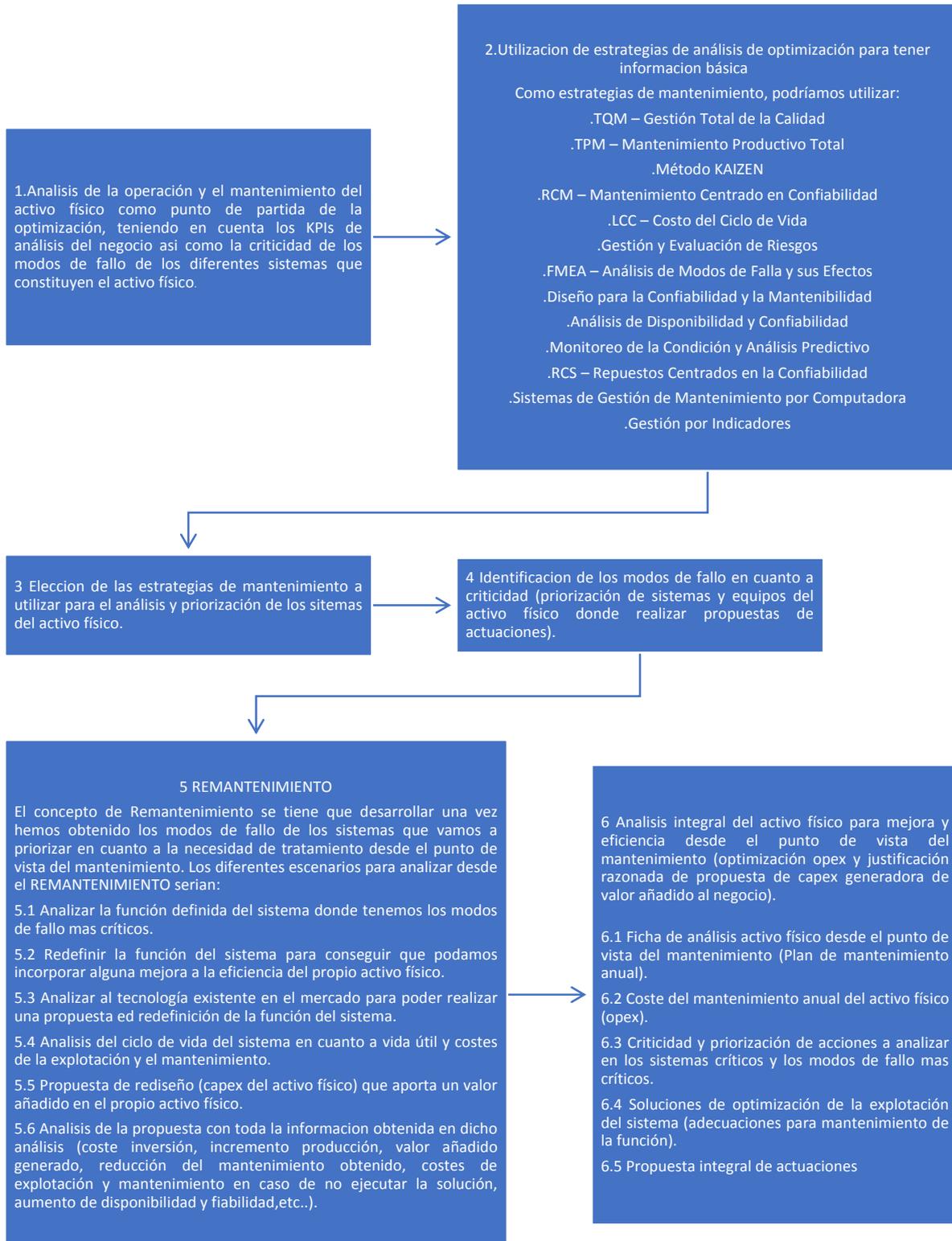
SISTEMA	MODO DE FALLO	TIPO DE FALLA	Propuesta Mto RCM
Alternador	Fallo aislamiento de alternador con cortocircuito espiras y avería catastrófica del sistema.	Eléctrica	Realización de ensayos de estado alternador con periodicidad corta para conocer el estado de alternador previo a avería catastrófica.
Turbina	Rotura alabes turbina por degradación material y cavitaciones. Avería catastrófica del sistema.	Mecánica	Realización de ensayos predictivos de vibraciones, control de aceites de cojinetes para conocer el estado de la turbina previo a avería importante con afectación producción eléctrica.
Telemando y control central	Avería eléctrica o mecánica de grupo sin aplicación por parte del telemando de una parada de emergencia. Avería catastrófica del sistema.	Electrica-Electrónica.	Realización de mantenimiento preventivo periódico para comprobar el estado de la instrumentación de campo de cara a garantizar el correcto control de parada de grupo ante avería (paro emergencia).
canal central hidroeléctrica	Rotura canal central. Avería catastrófica del sistema.	Obra civil	Control del estado de canal mediante vaciado e inspección de manera periódica.
Azud central hidroeléctrica	Fallo regulación caudal de agua concesional con falta caudal ecológico en el río. Delito medioambiental en explotación de la central.	Electrica-Electrónica.	Realización de mantenimiento preventivo periódico para comprobar el estado de la instrumentación de campo de cara a garantizar el correcto control de caudal derivado en azud.
Servicios auxiliares. Achique central	Fallo funcionamiento de bombas de achique con inundación de la central.	Electrica-Mecánica	Mantenimiento preventivo trimestral con comprobación funcionamiento sistema auxiliar.
Transformación	Fallo aislamiento del transformador combinado con rotura juntas y vertido aceite en la central. Falta ambiental.	Eléctrica	Realización de ensayos de estado transformador con periodicidad corta para conocer el estado de transformador previo a avería catastrófica.

### Propuesta de aplicación de Remantenimiento para definir opciones estratégicas de mejora

Pasar de ver el departamento de mantenimiento de la visión actual de “generación de costos” a conseguir ser una unidad de evaluación del activo físico a mantener y análisis riguroso de las diferentes posibilidades de optimización de dicho activo físico. Hasta ahora la función del mantenimiento se ha centrado en establecer una serie de estrategias de optimización basadas en la consecución de disponibilidad y fiabilidad al mínimo coste posible. Mediante esta visión parcial de negocio conseguimos que el máximo margen de mejora puede pasar por garantizar el funcionamiento del activo físico con menor coste pero sin generar un valor añadido al negocio.

La idea es “reinventar” el departamento de mantenimiento desde la base de ser “el mejor conocedor del activo físico en la organización para poder obtener toda la información y datos de análisis de manera objetiva”, evitando que la propia organización decida los rediseños o las inversiones a aplicar en el activo físico sin tener como principal fuente de información el análisis que ha realizado el departamento de mantenimiento. Para conseguir que las estrategias de optimización del mantenimiento que en la actualidad se utilizan sirvan como base de un análisis del activo físico, vamos a definir un nuevo concepto que denominaremos REMANTENIMIENTO y que comprende las acciones definidas en la figura 5.

Considerando la estrategia definida de “remantenimiento” y teniendo listadas las acciones prioritarias a actuar en el activo físico (central hidroeléctrica) que habíamos reflejado en la tabla 4, obtendríamos las propuestas indicadas en la tabla 5, que podríamos presentar a la organización como mejoras del propio activo físico a partir del análisis técnico económico de cada una.



**Fig. 5. Estrategia de Remantenimiento.**

**Tabla 5 . Propuestas de Remantenimiento planteadas para una minicentral hidroeléctrica.**

SISTEMA	Reinvención de la FUNCION	Propuesta REMANTENIMIENTO	Ventajas frente propuesta Mto RCM
Alternador	Conversión de la energía mecánica generada por la turbina en energía eléctrica para poder verter a la red eléctrica mediante funcionamiento a velocidad variable de la turbina y así poder eliminar el mínimo técnico turbinable de máquina, generando energía eléctrica el 100% de las horas posibles de funcionamiento.	Sustitución de alternador actual del (grupo asíncrono con velocidad constante), por un alternador de imanes permanentes asociado a un convertidor de frecuencia, que permita que el grupo hidroeléctrico pueda funcionar a velocidad variable.	.El grupo al funcionar a velocidad variable puede llegar a turbinar pequeños caudales de canal que anteriormente provocaban que estuviera el grupo parado (poco caudal por el río con la necesidad de respetar el caudal ecológico del río y por lo tanto la pérdida de caudales turbinables bajos por debajo del mínimo técnico.
Turbina	Conversión de la energía potencial del agua en el canal, en energía mecánica de giro de la turbina pudiendo bajar el mínimo técnico turbinable con mayor eficiencia potencia-caudal.	Sustitución de turbina actual por turbina de mayor curva de eficiencia como por ejemplo tipo turbina Crossflow	.mayor producción anual en caudales y saltos variables por alta eficiencia desde 12% -100% del caudal. .inicia funcionamiento con 6% del caudal
Telemando y control central-canal	Realizar el mando y el control del funcionamiento de la central hidroeléctrica con monitorización on line del estado del grupo (predictivo on line para poder tener información de estrategias basadas en mto a condición así como prever averías graves antes de que se produzcan).	Aplicación industria 4.0. (montaje de monitoreo de datos inalámbrico con captación directa de valores del proceso. Monitoreo de temperatura, presión, caudal de refrigeración, sensores de vibración fijos con comunicación inalámbrica).	.vigilancias mediante sistema de monitorización on line. .Realidad virtual para poder realizar un seguimiento remoto de las averías. .Monitorización on line de parámetros de campo del sistema.
canal central hidroeléctrica	Contener todo el caudal derivado del río hasta la central hidroeléctrica, incorporando la posibilidad de montar dentro del propio sistema una estructura de generación solar flotante y de control de la materia prima (agua) como es el control de caudal en grupo.	Montaje paneles solares flotantes en zona canal entrada central (zona limpiarrejas).	.mayor eficiencia de los módulos solares gracias al efecto refrigerante del agua. Huella mínima en el agua. .Incremento de generación eléctrica en instalación actual (central eléctrica) aprovechando la zona de canal más estable y controlada.
Azud central hidroeléctrica	Estructura de obra civil que permite elevar la cota de caudal de río y derivar el caudal concesional para poder turbinarlo desde la central, pudiendo controlar y regular el caudal de río y caudal ecológico mediante un nuevo sistema de turbinaje del paso de agua del azud de manera amigable para el medioambiente (fish friendly) y más regulada.	Montaje de hidrotornillo en el paso de agua regulada desde el azud para el control del caudal ecológico de río.	.Tecnología de generación microhidraulica más eficiente del mercado alcanzando resultados nominales por encima del 90% del caudal mínimo .Gran eficiencia (rendimiento 90%) .Instalación sencilla e integrada .Autoregulacion ante cambios de caudal.
SSAAux central. Achique central		Montaje placas solares y batería para garantizar el suministro en BT de los servicios auxiliares de la central. Montaje achique central mediante bomba sumergible y alimentación por energía solar. .Montaje arrancadores estáticos en motores de servicios auxiliares y bombas de achique reduciendo picos de consumo.	.Reducción consumo eléctrico de servicios auxiliares de la central con incremento de generación eléctrica. Posible incremento de generación eléctrica en red con otra fuente de energía renovable en la ubicación de la central hidroeléctrica.
Transformación		Sustitución transformador de potencia y servicios auxiliares por transformador seco.	.Mejora medioambiental de la instalación evitando tener miles de litros de aceite en un equipo estático de la central, y en un equipo de vida útil larga y con fugas en las juntas por envejecimiento. Mejora de eficiencia energética en la transformación de tensión de generación a tensión de red.

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista del mantenimiento en la gestión de activos físicos podemos tener un conocimiento muy exhaustivo del propio sistema industrial, que nos sirve como punto de partida para analizar la priorización de acciones a realizar en base a la criticidad de los diferentes sistemas pero no únicamente para “reducir” u optimizar el coste del presupuesto anual dedicado al mantenimiento, sino también para tener una base de análisis para poder justificar mejoras o inversiones que permiten mejorar la disponibilidad y fiabilidad del activo. Además este análisis desde el punto de vista del mantenimiento nos tiene que permitir redefinir las funciones a cumplir de los diferentes sistemas y equipos que componen el activo en base a soluciones de innovación tecnológica que además aporten un aumento de ingresos en la gestión estratégica del negocio. Mediante el presente artículo se ha definido y presentado un caso práctico relativo a una estrategia de análisis que hemos identificado como “remantenimiento” que nos aporta todo el conocimiento que podemos tener desde el punto de vista del mantenimiento, unido al análisis de posible rediseño del propio equipo para valorar las diferentes acciones estratégicas a implementar.

## REFERENCIAS

- [1] COETZEE, J. L.; CLAASEN, Schalk Johannes. “Reliability centred maintenance for industrial use: significant advances for the new millennium”. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2002, v. 13, n. 2, p. 97-129. Disponible en: <http://sajie.journals.ac.za/pub/article/view/311>
- [2] KIM, Hong Seok, et al. “Development of a power facility management system using reliability-centered maintenance”. In: *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing, China, 21-24 April 2008. p. 614-617. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4580362>

- [3] MONTILLA, Carlos A.; ARROYAVE, Juan Felipe; SILVA, Carlos Eduardo. "Caso de aplicación centrado en la confiabilidad RCM, previa existencia de mantenimiento preventivo". *Scientia et Technica*. 2007, v. 1, n. 37, p. 273-278. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4077>
- [4] MC LEOD, J., et al. "Failures profiles for maintenance in industrial facilities". In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, England. 2015, v. 2. Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewje3\\_fi3OLwAhVySTABHZwaCBUQFnoECAQQA&url=http%3A%2F%2Fwww.iaeng.org%2Fpublication%2FWCE2015%2FWCE2015\\_pp814-819.pdf&usg=AOvVaw0q4-2OKp7kkeRthOQzpKb2](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewje3_fi3OLwAhVySTABHZwaCBUQFnoECAQQA&url=http%3A%2F%2Fwww.iaeng.org%2Fpublication%2FWCE2015%2FWCE2015_pp814-819.pdf&usg=AOvVaw0q4-2OKp7kkeRthOQzpKb2)
- [5] DE SANCTIS, Ilaria; PACIAROTTI, Claudia; DI GIOVINE, Oreste. "Integration between RCM and RAM: a case study". *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2016, v. 16, n. 3, p. 852-880. Disponible en: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJQRM-02-2015-0026/full/html>
- [6] VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. "Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study". *Procedia Technology*. 2016, v. 25, p. 1080-1087. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316305655>
- [7] RODRÍGUEZ, Roberto Calixto; VALENZUELA, Salvador Sandoval; SOTO, Rogelio Rea. "Implantación gradual de estrategias de mantenimiento dentro de un proceso RCM". *Boletín IIE*, 2012. Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiJzY0t3uLwAhWASTABHXqhCQwQFnoECAQQA&url=https%3A%2F%2Fwww.ineel.mx%2Fboletin042012%2Fdivulga.pdf&usg=AOvVaw0a\\_WKGVByv24bWjLodsIJK](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiJzY0t3uLwAhWASTABHXqhCQwQFnoECAQQA&url=https%3A%2F%2Fwww.ineel.mx%2Fboletin042012%2Fdivulga.pdf&usg=AOvVaw0a_WKGVByv24bWjLodsIJK)
- [8] CÁCERES, Jurgén Stick Blanco; SUÁREZ, Oscar Manuel Duque. "Ingeniería de mantenimiento basada en confiabilidad a los equipos altamente críticos de la Empresa Comercializadora LICRATEX CA". *Mundo Fesc*. 2018, v. 8, n. 15, p. 41-48. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6638700>
- [9] Hydropower. "Tracking report-June 2020". International Energy Agency. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/hydropower>
- [10] SIFONTE, Jesus R.; REYES-PICKNELL, James V. "Reliability Centered Maintenance—Reengineered: Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R®". CRC Press, 2017. E. Calixto, Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis. Gulf Professional Publishing, 2016. ISBN-13:978-1498785174, ISBN-10:1498785174. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/Jesus-R-Sifonte/dp/1498785174>
- [11] Norma UNE-EN 60812 (2018). "Técnicas de análisis de fiabilidad de sistemas". Procedimiento de análisis de modos de fallo y sus efectos (AMFE). Disponible en: <https://www.normadoc.com/spanish/une-en-iec-60812-2018.html>
- [12] Norma IATF 16949:2016. Norma internacional de sistemas de gestión de la calidad para la automoción. Disponible en: <https://www.isotools.com.mx/iatf-169492016-sistemas-gestion-la-calidad-la-industria-del-automovil/>
- [13] Norma UNE-EN 60300-3-11 (2017). Gestión de la confiabilidad. Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0051579>
- [14] Norma UNE-EN 13306 (2018). Mantenimiento. Terminología del mantenimiento. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060338>
- [15] ISLAM, H., et al. "Reliability-centered maintenance methodology and application: a case study". *Engineering*. 2010, v. 2, n. 11, p. 4. Disponible en: [https://www.scirp.org/html/3\\_8101205\\_3165.htm](https://www.scirp.org/html/3_8101205_3165.htm)
- [16] MARTINEZ-MONSECO, Francisco Javier. "Analysis of maintenance optimization in a hydroelectric power plant". *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*. 2020, v. 1, n. 1, p. 23-29. Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewicJr84eLwAhW2QjABHY3nDgsQFnoECAUQAA&url=https%3A%2F%2Fpolipapers.upv.es%2Findex.php%2FJARTE%2Farticle%2Fdownload%2F13738%2F12879&usg=AOvVaw1lxvOK1\\_Su4U7C6xZfYvTX](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewicJr84eLwAhW2QjABHY3nDgsQFnoECAUQAA&url=https%3A%2F%2Fpolipapers.upv.es%2Findex.php%2FJARTE%2Farticle%2Fdownload%2F13738%2F12879&usg=AOvVaw1lxvOK1_Su4U7C6xZfYvTX)
- [17] MARTINEZ-MONSECO, Francisco Javier. An approach to a maintenance plan for a turbine of hydroelectric power plant. Optimisation based in RCM and FMECA analysis. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 2021, 2.1: 39-50. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/161621>
- [18] Norma ISO 14224:2016. Industria del petróleo y gas natural. Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. Disponible en: <https://predictiva21.com/cambios-en-la-norma-iso-142242016/>

### **CONFLICTO DE INTERESES**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### **CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES**

**Francisco Javier Martínez Monseco** <https://orcid.org/0000-0003-1484-6579>

Diseño de la investigación, recolección de datos, modelación matemática, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Albert Planaguma Vilamitjana** <https://orcid.org/0000-0001-9926-9314>

Análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.