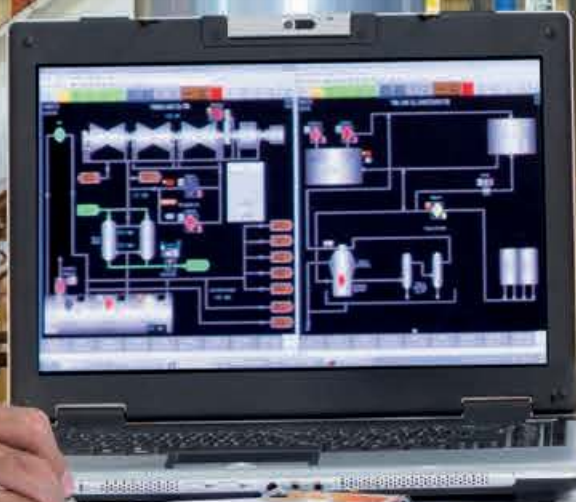


Sin análisis de confiabilidad, es imposible mejorar sistemáticamente las políticas de mantenimiento y, sin una muestra de información de calidad, la toma de decisiones tras el análisis de confiabilidad resultará imprecisa.



Optimizando el proceso de construcción de modelos de decisión en el mantenimiento industrial por análisis de confiabilidad predictivo y dinamismo RCM

Optimizing the Construction Process of Industrial Maintenance Decision Models by using Predictive Reliability Analysis and RCM Dynamism

RESUMEN

Un proceso estocástico, a diferencia de un proceso determinístico, en vez de tener una posible realidad de cómo un proceso puede evolucionar con el tiempo. Posee una evolución futura indeterminada (proceso aleatorio). Esta incertidumbre está descrita por las distribuciones de probabilidad.

Los eventos de falla, en un activo físico, obedecen justamente a un orden aleatorio basado en una distribución de probabilidad, la misma que es habitualmente representada en los análisis de confiabilidad (RA) como herramienta para la gestión del mantenimiento, cuyos resultados propiciarían criterios de decisión que permitan optimizar sus estrategias.

Los análisis de confiabilidad, empleados en la actualidad, recurren a las dimensiones de datos de edad y de probabilidad de falla para disponer de una representación gráfica bidimensional (función de densidad de probabilidad de falla, PDF) que confiera una relación entre ellas y proponga resultados que alimenten el criterio de la toma de decisiones. Sin embargo, si el fin es optimizar decisiones de gestión del mantenimiento, es necesario asegurar un registro de todas aquellas variables significativas disponibles para generar muestras sólidas y coherentes a fin de construir modelos precisos de decisión, a partir de un análisis de confiabilidad multidimensional.

La propuesta que se presenta declara que la correcta consistencia de una muestra parte del grado de dinamismo con el que el cuerpo de conocimiento RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad) se vincula con la gestión diaria de las órdenes de trabajo bajo CMMS (sistema computarizado de gestión del mantenimiento) o EAM (sistema de gestión de activos empresariales), los mismos que no son pensados para favorecer un análisis de confiabilidad.

Las órdenes de trabajo propiciarán datos completos de edad e instancias de actualización para los registros FMEA (análisis de modos y efectos de fallas) a medida que se presenten nuevas

ocurrencias de modos de falla. Además de la contribución de los programas CBM (mantenimiento basado en la condición) que añadirán a la muestra, las variables relevantes predictivas sobre los modos de falla que ocurren y que habitualmente se encuentran omitidas o pobremente inmiscuidas en la gráfica PDF bidimensional y, por tanto, tienden a no ser contenidas en los análisis de confiabilidad regulares.

La calidad de la muestra se asegurará y se preparará rutinariamente con los atributos de edad y condición que correspondan para potencializar el modelamiento predictivo con resultados satisfactorios sobre los pronósticos probabilísticos, y que respalden las estrategias de mantenimiento a emplear en el momento y componente apropiados, a fin de garantizar un incremento del rendimiento sobre la inversión (ROI) de las plantas industriales.

ABSTRACT

A stochastic process, unlike a deterministic process, instead of having one possible reality of how a process can evolve over time, has an indeterminate future evolution. This uncertainty is described by the probability distributions.

Failures events in a physical asset follow a random order based on a probability distribution, which is often represented in the reliability analysis as a tool for the maintenance management, whose results would offer decision criteria in order to optimize maintenance strategies.

Current reliability analysis (RA) employ data dimensions based on age and failure probability in order to obtain a two-dimensional graphic representation (probability density function of failure, PDF) that provides a connection between them and suggesting results that could improve the making-decision criteria. However, if the plan is to optimize maintenance



Palabras clave

Mantenimiento centrado en la confiabilidad, análisis de confiabilidad, sistema computarizado de gestión del mantenimiento, sistema de gestión de activos empresariales, mantenimiento basado en la condición, modelo de riesgos proporcionales.

Key words

Reliability Centered Maintenance (RCM), Reliability Analysis (RA), Computerized Maintenance Management System (CMMS), Enterprise Asset Management (EAM), Condition Based Maintenance (CBM), Proportional Hazards Model (PHM)

management, it is necessary to assure a record of all the significant available variables to generate solid and coherent samples, in order to build up precise decision models beginning with a multidimensional reliability analysis.

The following proposal states that the proper consistency of a sample initiates with the degree of dynamism which the body of knowledge RCM (Reliability Centered Maintenance) links to the daily work orders management, under the CMMS (Computerized Maintenance Management System) or EAM (Enterprise Asset Management), which are not thought to be in favor of a reliability analysis.

Work orders will be converted in definition stages for the life cycles and for the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) records upgrading as new failure modes occurrences appear. In addition to CBM (Condition Based Maintenance) strategies complicity, which will add in the sample relevant predictable variables over the occurred failure modes, which usually are omitted or poorly involved in the two-dimensional PDF graphic, and therefore, are not often considered in the common reliability analysis.

Quality of the sample is therefore assured and routinely prepared with the age and condition attributions, which gives a potential predictive model with satisfactory results about the probabilistic forecast, being able to sustain the maintenance strategies employed at the appropriate time and proper component, in order to guarantee, the return on investment (ROI) growth in the industrial plant.

Es común que la calidad de la información ingresada en las órdenes de trabajo sea insuficiente para construir modelos de decisión predictivos. Es común que el cuerpo de conocimiento inicial RCM, generado a partir del consenso de los mejores recuerdos y experiencias de los analistas involucrados en ese momento, tienda a ser inexacto y estático. Muchas veces, la esencia de su pensamiento distorsionada por la ambigüedad adoptada por los sistemas CMMS/EAM en su estructura de codificación de ciclos de vida.

Dado el dinamismo constante de la producción, de la innovación tecnológica y del crecimiento de la experiencia en el mantenimiento, resulta fundamental mantener la jerarquía RCM dinámica y a la vista del proceso diario de órdenes de trabajo, de modo que las estrategias de mantenimiento se revisen de forma continua para acercarse cada vez más a la realidad del contexto operacional actual. Es decir, establecer un vínculo permanente entre la teoría y la práctica, donde es la teoría dispuesta en la base de conocimiento inicial RCM y definida por la descripción precisa de eventos probables, mientras que la práctica, comprende al sistema de órdenes de trabajo, constituyendo los eventos ocurridos en la realidad y las tareas proactivas o reactivas de mitigación que se emplearon. Esta conexión logra una correlación analítica que da como resultado una práctica mejorada para alcanzar la confiabilidad a partir de los datos de edad.

Es habitual, además, que dentro de las políticas de prevención de muchas organizaciones de mantenimiento, las decisiones de intervenir por reemplazos generen un gran desaprovechamiento de vida útil en el activo intervenido. Y si, bajo esta filosofía, tratáramos a un activo costoso, la decisión de una intervención frecuente por CBM resultará una mejor opción que la de un reemplazo regular, puesto que permite comprender mejor el comportamiento de su «salud» para tomar decisiones TBM (mantenimiento centrado en el tiempo) oportunas, traduciendo su resultado en una reducción de los costos globales e incremento de vida útil.

Resulta, entonces, fundamental optimizar la toma de decisiones bajo un enfoque de estimación de la probabilidad condicional de falla que combine datos de edad y EHM a través de un modelo de riesgos proporcionales. Por tanto, aquellas variables CBM que puedan guardar relación con los modos de falla que ocurren no deben ser ignoradas en los modelos probabilísticos de predicción.

Sin análisis de confiabilidad es imposible mejorar sistemáticamente las políticas de mantenimiento, y sin una muestra de información de calidad, la toma de decisiones tras el análisis de confiabilidad resultará imprecisa.

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en una organización de mantenimiento debería enfocarse en centrar sus esfuerzos para convertir su información en conocimiento, a fin de construir modelos de decisión que respalden la integridad de un activo físico bajo una gestión efectiva del riesgo en términos de confiabilidad. Tal conocimiento toma como origen la generación de muestras de información completas y precisas en base a los datos, los que alimentarán las bases para la optimización de la toma de decisiones en el mantenimiento.

Ante esto, surge la necesidad de establecer una estrategia de recolección de datos de fuentes de información diversas para propiciar la muestra:

- Información EHM (monitoreo de la salud del equipo), CBM: datos de condición.
- Información de órdenes de trabajo – CMMS/EAM: datos de edad.
- Información de operación (PCS, DCS, SCADA, etc.).
- Base de conocimiento RCM.
- Información del negocio: datos de costos.

Tanto los datos de condición como los datos de costos, son habilitados por tecnologías de recolección precisas que han alcanzado notable madurez a lo largo de los años. Sin embargo, los datos de edad, persistentemente inconsistentes e imprecisos en las órdenes de trabajo (CMMS/EAM), no respaldan al análisis de confiabilidad para la aplicación de algoritmos de pronóstico de eventos de falla.

FUNDAMENTOS

Fuentes de información

La gestión del mantenimiento debe ser soportada por informaciones diversas que converjan en la toma de decisiones. Como fuentes de información, se rescatan las siguientes:

A. Datos de edad: Información que determina el comienzo y el fin de un ciclo de vida. Define la característica de la ocurrencia de un modo de falla.

- a. Eventos de **falla funcionales** (pérdida de la función de un activo).
- b. Eventos de **falla potenciales** (estado previo a la falla funcional).
- c. Eventos de cese por **suspensiones** (prevención de un modo de falla mayormente).

B. Datos EHM: Información relevante de condición en relación a los modos de falla de interés.

a. Inspecciones.

b. Datos del proceso de los sistemas de control.

- i. Externas:** Esfuerzos externos con posibles consecuencias de fallas funcionales.
- ii. Internas:** Propias de la degradación de su condición. Detectan la evidencia de una falla potencial.

C. Eventos no rejuvenecedores: Información de tareas menores de mantenimiento que no añaden «vida» al activo, pero alteran los datos EHM durante su recopilación.

D. Datos de costos: Información monetaria en relación a la implicancia de un evento de fallo o de prevención.

Modelos de predicción de confiabilidad (distribución Weibull)

Se basa en un método analítico de eventos de falla que proporciona predicciones de confiabilidad además del nivel de confianza con el cual se podían emplear tales predicciones. Sus indicadores principales son los siguientes:

- **f(t):** Función de densidad de probabilidad de falla (PDF), dada por:

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

- **F(t):** Función de distribución acumulada de probabilidad de falla (CDF), dada por:

$$F(t) = 1 - \exp - \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \tag{2}$$

- **h(t):** Función del riesgo o tasa de fallas (probabilidad condicional de falla), dada por:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{3}$$

Donde las variables β , η , y t corresponden al parámetro de forma, al parámetro de escala y a la edad de desgaste respectivamente.

Optimización TBM (modelamiento de costos)

La variable t_p refiere al tiempo en el cual una intervención preventiva se lleva a cabo óptimamente, cuyo valor resultaría en el aumento de la rentabilidad del negocio, costos esperados: bajos. Por tanto, conocerlo resultaría favorable.

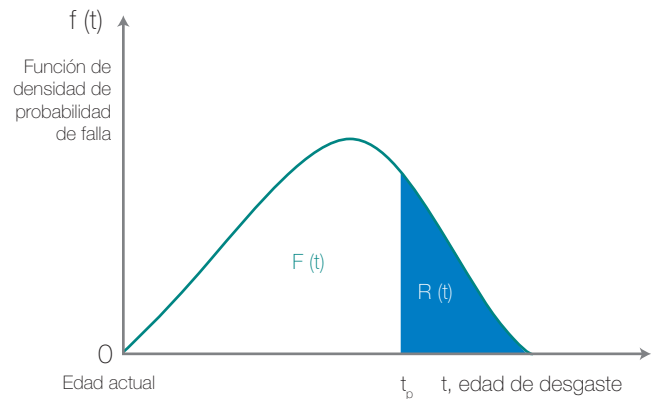


Figura 1. Función de la densidad de probabilidad de falla. Áreas de probabilidad de falla acumulada y confiabilidad. Fuente: Elaboración propia.

$$C_t = C_R R(t_p) + C_F [1 - R(t_p)] \tag{4}$$

$$t_t = t_p R(t_p) + t_f [1 - R(t_p)] \tag{5}$$

$$\frac{C_t}{t_t} = \frac{C_R R(t_p) + C_F [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_0^{t_p} t_f(t) dt} \tag{6}$$

Donde las variables C_t , C_r , C_f corresponden al costo esperado, al costo de una intervención preventiva y al costo de falla respectivamente. La misma referencia se da sobre los tiempos t_t , t_p , t_f .

Modelo de riesgos proporcionales (Cox PHM) y proceso no homogéneo de modelamiento de tiempos de falla (Markov)

Cox PHM amplía la distribución Weibull para cubrir la realidad de las variables EHM (programas CBM). Procedimiento para estimar la probabilidad de falla de un activo físico no solo bajo un criterio de edad, sino también bajo un criterio de condición. Dado por:

$$h(t, Z(t); \beta, \eta, \gamma) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} \exp \{ \sum_{i=1}^m \gamma_i Z_i(t) \} \tag{7}$$

Donde las variables $Z_i(t)$ y γ_i corresponden a la variable de condición monitoreada por CBM en un instante t y al parámetro vector que declara el grado de incidencia de la variable de condición sobre la función del riesgo respectivamente. Mientras que Markov modela la probabilidad de transición de los vectores de las variables EHM de un estado a otro (matriz de transición de probabilidad).

METODOLOGÍA

Claramente, es un gran acierto para una organización decidirse por CBM, ¿quién no busca maximizar la vida útil de un activo antes de generarle indisponibilidad por estrategias TBM muy conservadoras? Sin embargo, conducir tal deseo hacia un efectivo programa CBM para intervenciones oportunas no es tarea fácil. Puede resultar dificultoso identificar aquellas variables EHM más significativas e interpretar su influencia sobre la vida útil remanente (RUL). Adicional a ello, está la imprecisión de los sistemas CMMS/EAM en satisfacer muestras consistentes con los requerimientos necesarios de datos de edad, lo que conlleva al fracaso por alcanzar algoritmos de pronóstico de decisión en los planes de mantenimiento. Sin embargo, identificadas las variables de condición correctas y los datos de edad bien definidos, se podrá establecer con precisión decisiones de intervención TBM buenas y oportunas sobre el activo en estudio bajo los siguientes criterios:

- Intervención inmediata dada su condición crítica.
- Intervención planificada dentro del periodo que sigue a la inspección CBM realizada, pero antes de la siguiente.
- Continuar operando hasta la próxima inspección CBM.

Además de la optimización de TBM por análisis de confiabilidad regular (edad vs. probabilidad de falla), Cox PHM refina aún más esta optimización a través de modelos predictivos de decisión soportados bajo una estructura que propicia la interacción entre los distintos niveles de jerarquía del Departamento de Mantenimiento. Esto se realiza a través de métricas *lagging* y *leading*, enfatizando sobre aquellas que refieran a la operatividad del día a día, donde el personal pueda influenciarlas (*leading*) para que respalden a las métricas organizacionales (*lagging*).

Jerarquía RCM real, actualización de su conocimiento y definición de datos de edad

El personal directamente relacionado con los planes de mantenimiento consolidará el conocimiento de las órdenes de trabajo que fueron cerradas sobre la jerarquía RCM, ya sea validando aquellos modos de falla declarados en su base de conocimiento inicial, modificándolos o agregando nuevos de acuerdo con lo ocurrido en campo. Es decir, de observar divergencias entre la realidad y el conocimiento inicial RCM, se actualizará este último al escenario real. Esto permitirá al RCM representar el conocimiento colectivo para justificar planes de mantenimiento que representen estrategias de mitigación que se ajusten a la realidad y sirvan de premisa al planificar futuras órdenes de trabajo.

Downtime Administration System (DAS)

Fleet: ALL State: ALL From: To: Search Clear Add

Code	Equipment	Category	Started on	Closed on	Fleet	Description of Symptoms	State	Actions
LrcmG1Ex4b	LRCM_G1	DEFAULT	05/24/2017 12:05 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Insufficient cooling	Reparando	⌵ ⌵
LrcmG1Ex4a	LRCM_G1	DEFAULT	05/24/2017 12:00 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Insufficient cooling	Aviso de Entrega	⌵ ⌵
LrcmG1Ex4	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 02:17 PM	05/11/2017 05:30 PM (CLOSED SUCCESSFULLY)	Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	AC not cooling.	Reparando	⌵ ⌵
LrcmG1Ex3	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 02:08 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Found a fuel hose with minor wear.	Reparando	⌵ ⌵
LrcmG1Ex2	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 02:00 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Found partially worn fuel hose. About to fail.	Reparando	⌵ ⌵
LrcmG1Ex1	LRCM_G1	DEFAULT	05/04/2016 01:48 PM		Hydraulic shovel Hitachi EX3600-LRCM G1	Shovel arm does not lift.	Reparando	⌵ ⌵
WOA0005	EQ_TST_05	DEFAULT	03/19/2015 03:48 PM		HVAC Chilled Water Plant.	TEST WORK ORDER NUMBER 5	Esperando Respuesta	⌵ ⌵
WOY0001	EQ_TST_04	DEFAULT	01/29/2015 11:38 PM		HVAC Chilled Water Plant.	TEST WORK ORDER NUMBER 4	Esperando Respuesta	⌵ ⌵

Figura 2. Vinculación de una orden de trabajo sobre la jerarquía RCM.

Fuente: MESH software.

MESH software es un sistema computarizado de gestión efectiva de la información y el conocimiento del mantenimiento a fin de extraer muestras precisas y de calidad para análisis de confiabilidad. Vincula permanentemente a los sistemas de órdenes de trabajo (CMMS/EAM) con la base de conocimiento RCM.

Dada la forma en cómo se registran las órdenes de trabajo en los sistemas CMMS/EAM, la consistencia de la información de los datos de edad para la muestra que se pretende no podría ser generada desde esta instancia, por lo que es necesario

referirse a la base de conocimiento RCM. Esta vinculación de conocimientos (CMMS/EAM y RCM) define sobre el modo de falla en análisis (orden de trabajo), un tipo de evento de fin como de inicio.



Figura 3. Definición de eventos de fin de modos de falla.
Fuente: MESH software.

Dashboard de KPIs, mejoras de conocimiento y estimación simple de la confiabilidad

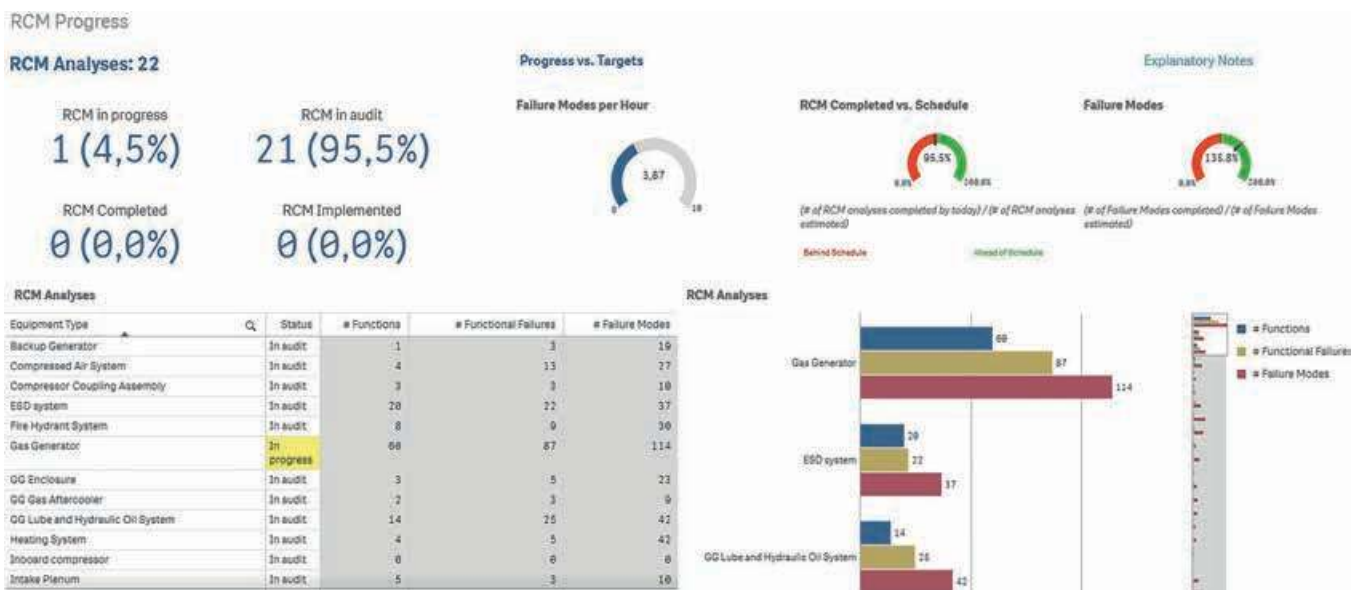


Figura 4. Cuadro de mando integral de desempeño RCM.
Fuente: MESH software.

Dado que el cuerpo de conocimiento RCM se encuentra entre las herramientas intelectuales con mayor valor en la gestión de activos dentro de una organización, su crecimiento sistemático debe ser monitoreado y dispuesto a todo el personal

correspondiente a través de un cuadro de mando integral. Sus métricas resaltarán con precisión las debilidades de nuestra política de mantenimiento y fomentarán acciones de control para optimizar su gestión.



Figura 5. Estimación simple de la confiabilidad desde la jerarquía RCM.
Fuente: MESH software.

Un panorama rápido desde la forma más básica de confiabilidad es revelado desde la base de conocimiento RCM a través de su MTBF (tiempo promedio entre fallas). El conteo del número de instancias existentes de un modo de falla en cuestión en un tiempo transcurrido, definido por el usuario, favorece a este indicador. Panorama que, además, validará los datos para técnicas avanzadas de confiabilidad y modelamiento predictivo.

Preparación de la muestra y análisis de confiabilidad avanzado

Los eventos no rejuvenecedores no deben ser ignorados, pues confundirá el análisis al asumir que la condición de un activo ha mejorado de alguna manera, no se conoce la razón, pero mejoró. Estos eventos deben tenerse en cuenta al elaborar un análisis predictivo correlacionado con la probabilidad de falla. Su identificación ignorará esas mejoras «artificiales» de la condición monitoreada y refinará el modelamiento de análisis predictivo reduciendo la desviación estándar en la estimación de la vida útil remanente (RULE).

Una vez con los datos de edad correctamente definidos y completos, se le sobrepondrán aquellas variables EHM que guarden un patrón precedente de influencia significativa sobre los eventos de falla potenciales y funcionales. Esta muestra de información combinada representa la fuente de entrada para el proceso Cox PHM, y tras el resultado de su análisis, la consecuente toma de decisiones optimizada.

El proceso Cox PHM - Markov cuantificará el riesgo combinado, extendiendo sobre la edad aquellas variables EHM influyentes. Esta influencia logra medirse por su grado de significancia, es decir, de cuan bien se encuentran estadísticamente relacionadas con el modo de falla bajo análisis.

La sinergia de estas etapas permite, como aporte, lo siguiente:

- Registrar, claramente, datos de edad definiendo su tipología de ciclo de vida respecto a un modo de falla en análisis al momento de cerrar una orden de trabajo.
- Retroalimentar, dinámicamente, la base de conocimiento inicial RCM a través de un permanente vínculo con las órdenes de trabajo cerradas, con el fin de evaluar cualquier

discrepancia entre la jerarquía inicial RCM y la realidad observada con respecto a los modos de falla ocurridos, sus efectos, consecuencias y tareas de mitigación (conocimiento RCM coincidente con la realidad).

- Capturar variables de valor predictivo influyentes sobre los modos de falla en análisis y que infieran directamente sobre el modelo de riesgo.
- Propiciar muestras de información sólidas y completas.
- Aplicar técnicas avanzadas de análisis de confiabilidad.
- Referir a la base de conocimiento RCM no solo al cerrar las órdenes de trabajo, sino también cuando estas se planifiquen, convirtiendo a la jerarquía RCM en fuente fidedigna para los planes de mantenimiento futuros para hacer frente óptimamente a los modos de falla, sus efectos y sus consecuencias.

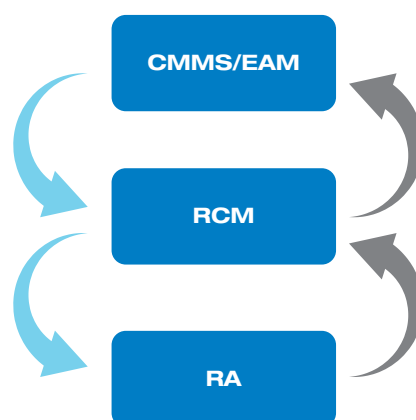


Figura 6. Interacción sistemas CMMS/EAM, RCM y RA.
Fuente: Elaboración propia.

Aporte que trasciende en premisas fundamentales para conducir la construcción de modelos predictivos de decisión en la gestión estratégica del mantenimiento. Gráficamente:

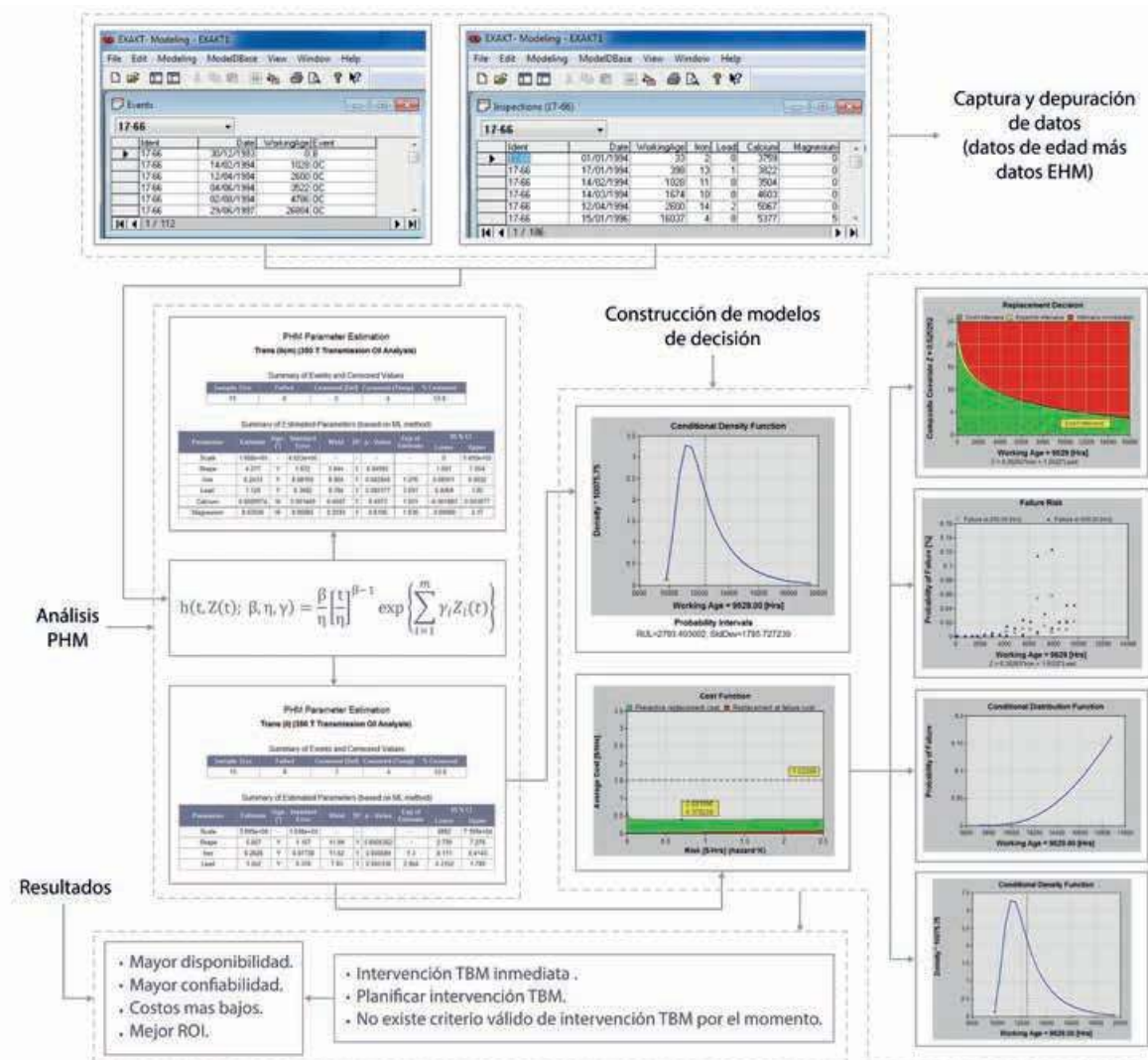


Figura 7. Propuesta de la estructura de construcción de modelos predictivos de decisión. Técnica CBM: análisis de aceite. Variables EHM (ppm): Fe, Pb, Ca y Mg. Fuente: Elaboración propia.

PHP Parameter Estimation Trans (ilcm) (350 T Transmission Oil Analysis)

Summary of Events and Censored Values

Sample Size	Failed	Censored (Def)	Censored (Temp)	% Censored
13	6	3	4	53.8

Summary of Estimated Parameters (based on ML method)

Parameter	Estimate	Sign. (*)	Standard Error	Wald	DF	p. Value	Exp of Estimate	95% CI	
								Lower	Upper
Scale	1.608e+05	-	4.023e+05	-	-	-	-	0	9.493e+05
Shape	4.277	Y	1.672	3.844	1	0.04992	-	1.001	7.554
Iron	0.2433	Y	0.08155	8.904	1	0.002845	1.276	0.8351	0.4032
Lead	1.129	Y	0.3682	9.394	1	0.002177	3.091	0.4069	1.85
Calcium	0.0009974	N	0.001469	0.4607	1	0.4973	1.001	-0.001883	0.003877
Magnesium	0.03506	N	0.06885	0.2593	1	0.6106	1.036	-0.09988	0.17

Tabla 1. Evaluación PHM de la muestra. EHM: Variables relevantes para el algoritmo predictivo: Fe y Pb. Variables irrelevantes: Ca y Mg. Fuente: EXAKT software.

**PHP Parameter Estimation
Trans (ii) (350 T Transmission Oil Analysis)**

Summary of Events and Censored Values

Sample Size	Failed	Censored (Def)	Censored (Temp)	% Censored
13	6	3	4	53.8

Summary of Estimated Parameters (based on ML method)

Parameter	Estimate	Sign. (*)	Standard Error	Wald	DF	p. Value	Exp of Estimate	95% CI	
								Lower	Upper
Scale	3.899e+04	-	1.638e+04	-	-	-	-	6882	7.109e+04
Shape	5.007	Y	1.57	11.59	1	0.0005352	-	2.739	7.276
Iron	0.2626	Y	0.07738	11.52	1	0.000689	1.3	0.111	0.4143
Lead	1.052	Y	0.376	7.83	1	0.005138	2.864	0.3152	1.789

Tabla 2. Reajuste de la evaluación PHM de la muestra. Variables EHM relevantes: Fe y Pb.
Fuente: EXAKT software.

EXAKT software es una potente herramienta computacional para realizar análisis de confiabilidad. Su análisis extiende las dimensiones de un análisis de confiabilidad basado en la edad, al incluir datos de monitoreo de condición. Su objetivo es el de predecir eventos de falla y optimizar las estrategias del mantenimiento basado en la condición (CBM).

Un valor del parámetro de forma (β) elevado puede significar lo siguiente:

- Las variables EHM no guardan mucho valor predictivo sobre el modo de falla en análisis (más dependientes de la edad).
- Existen variables EHM influyentes, pero no monitoreadas (hay mejores candidatas).
- Existencia de inconsistencia en la identificación del modo de falla (forma de su registro en los sistemas CMMS/EAM).
- Mala distinción entre eventos de edad (suspensiones confundidas con fallas).

En cambio, un bajo valor del parámetro de forma nos indicará que el programa CBM empleado es efectivo, las variables EHM predominarán en criterio sobre la probabilidad de falla y, por

lo tanto, las decisiones tomadas del modelamiento predictivo basadas en CBM serán óptimas.

Los resultados que se generarían tras el análisis PHM propiciarán dos criterios de decisión:

- Tomar decisiones bajo un criterio de la probabilidad de falla. Es decir, tomar decisiones en función al RUL, el mismo que se encuentra sujeto al grado de dispersión de sus datos, dispersión relacionada de manera directa y proporcional con la desviación estándar y el parámetro de escala, pero con influencia inversa sobre el nivel de confianza para valerse del RUL para la toma de decisiones. Las decisiones de mantenimiento que respaldan este criterio son comunes cuando los costos que incurren correr hasta la falla no se pueden estimar o son desconocidos, como eventos de falla que involucran serias consecuencias HSE (salud, seguridad y medioambiente).

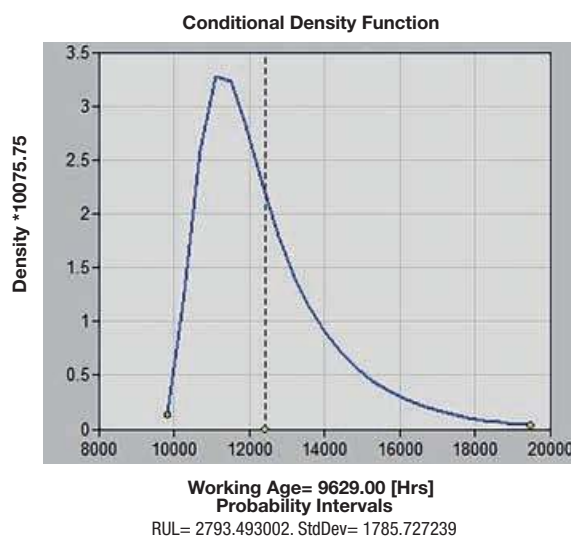


Figura 8. Función de densidad de probabilidad de falla. RUL: 2793.49 horas. Edad de operación actual: 9629.00 horas. σ : 1785.73 horas.
Fuente: EXAKT software.

La desviación estándar es un excelente indicador del desempeño predictivo en una estrategia CBM. Es un indicador indirecto de la precisión de datos de edad reportados en las órdenes de trabajo, por lo que servirá para evaluar el manejo de la información de un sistema CMMS/EAM.

- Decidir bajo criterios de rentabilidad y probabilidad de falla. Es decir, tomar decisiones basadas en los datos de edad y las variables significativas EHM (RUL), y vincularlas con los costos globales de mantenimiento (datos del negocio) para alcanzar un nivel óptimo del riesgo que garantice la más alta disponibilidad a un riesgo que resulta alcanzando el menor costo de mantenimiento. Este criterio soporta decisiones relacionadas con las consecuencias operacionales y no operacionales de un modo de falla, cuyo impacto económico puede ser calculado. Su modelo de decisión está representado por la suma ponderada de las variables EHM respecto al a la edad, identificando la mejor decisión oportuna de intervención TBM.

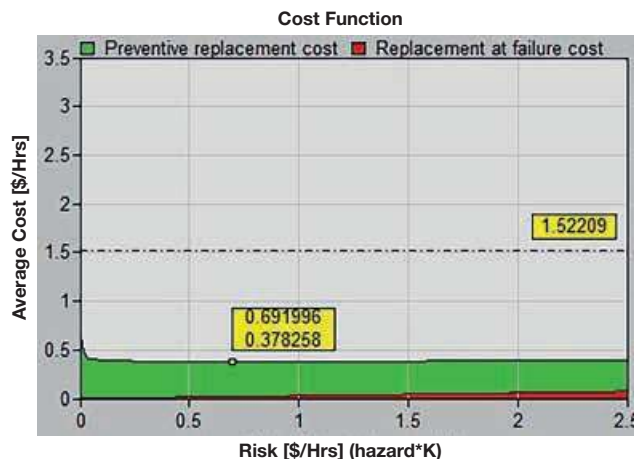


Figura 9. Función costo. Costo global promedio vs. riesgo. Fuente: EXAKT software.

	Cost [\$/Hrs]	Preventive Repl. Cost [\$/Hrs]	Failure Repl. Cost [\$/Hrs]	Prev. Repl. [%]	Failure Repl. [%]	Expected Time Between Replacements
Optimal Policy	0.378258	0.356373 (94.2 %)	0.0218851 (5.8 %)	98.8	1.2	3326.4
Replacement Only At Failure	1.52209	0 (0.0 %)	1.52209 (100.0 %)	0.0	100.0	3941.95
Saving	1.14383 (75.1 %)	-0.356373	1.5002	-98.8	98.8	-615.548

Tabla 3. Resumen de la información gráfica de la función costo. Fuente: EXAKT software.

La figura 9 ilustra la minimización del costo promedio global en función del contraste entre la información del costo promedio de un evento de falla funcional y el costo promedio de un reemplazo preventivo. El área roja representa los costos promedios atribuidos a eventos no planeados (fallas); y el área verde, a los costos promedios atribuidos a intervenciones TBM. El riesgo óptimo al costo promedio general ideal y el que se pretende: 0.69; 0.38 \$/hora.

La tabla 3 compara los costos y los tiempos promedios entre intervenciones por mantenimiento. Detalla que el costo mínimo de mantenimiento por la política propuesta del modelo resultante es de 0.38 \$/hora (94.2 % TBM y 5.8 % correctivo), tras fijar nuestras intervenciones por mantenimiento a largo plazo a 98.8 % por TBM bajo un MTBR de 3326.40 horas por sobre 1.2 % de intervenciones correctivas. De continuar sin la política propuesta, el costo por hora de mantenimiento resulta ser 75.1 % mayor que el óptimo, bajo un 100 % de intervenciones correctivas con un MTBF aproximado de 3 941.95 horas.

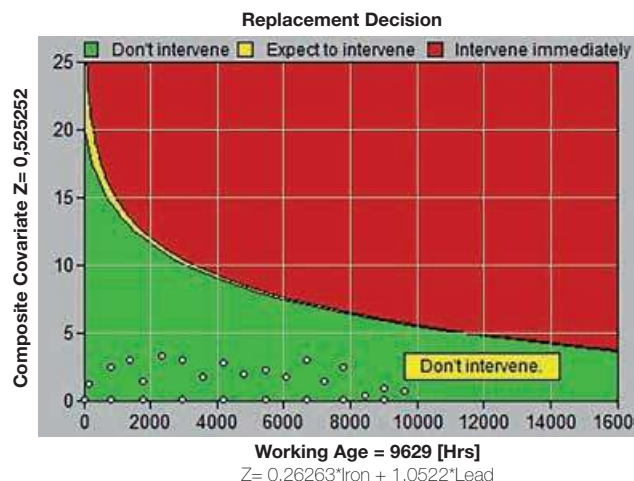


Figura 10. Suma ponderada de variables EHM vs. edad. Fuente: EXAKT software.

17-66: Condition-Based Replacement Policy – Decision Report
Trans (il) (350 T Transmission Oil Analysis)

Decision Parameters	
Recommendation	Don't intervene
Expect to Replace in [Hrs]	2 311.39
Probability of Failure in (250) [Hrs]	0.000210552
Probability of Failure in (500) [Hrs]	0.000443523
Report Date	06/07/18
Current Status	In operation

Tabla 4. Interpretación resumida de la figura 10. Fuente: EXAKT software.

Las decisiones tomadas a partir de la figura 10 recaen sobre la suma ponderada. De resultar el análisis sobre el área verde, implica que no se requiere intervención TBM por el momento; sobre el área amarilla, el activo no requiere TBM antes de la siguiente intervención CBM; y si se da sobre el área roja, se traduce en una intervención TBM inmediata. Prever reemplazo preventivo en 2 311.39 horas.

El criterio que se tome depende del alcance de las responsabilidades de sus gestores. Sin embargo, ambos son válidos.

RESULTADOS

Dada que esta iniciativa tiene sus bases en el personal más que en la tecnología, su soporte recae, permanentemente, sobre los indicadores de bajo nivel.

La metodología propició una mejora sistemática de la base del conocimiento RCM a través de sus continuas actualizaciones basadas en los registros reales de las órdenes de trabajo para respaldar al análisis de confiabilidad, lo que favorece la optimización del planeamiento de futuras órdenes de trabajo de mantenimiento en cuanto a estrategias y frecuencias de intervención.

Se mejoró la confianza del modelamiento predictivo al reducir la desviación estándar en el RULE gracias a la completa y correcta definición de los datos de edad. El mismo efecto trajo consigo la adecuada identificación de las variables EHM que, añadidas a la edad, redujeron el parámetro de forma dispuesto por el proceso Cox PHM, traducido en la subsecuente mejora de la efectividad de los programas CBM sobre la probabilidad de falla.

El proceso, básicamente, mejoró la forma de pensar del análisis de confiabilidad bidimensional tras hacerlo multidimensional. Una representación gráfica de esta mejora se ilustra como sigue:

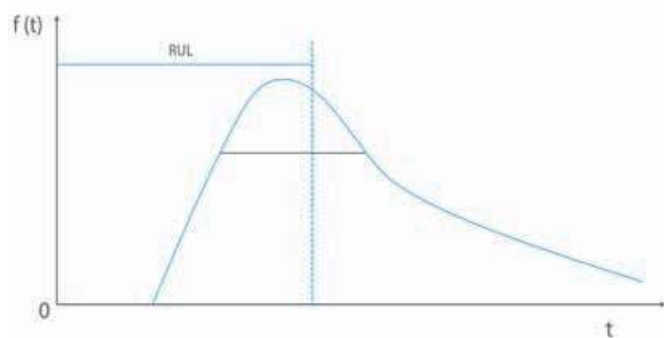


Figura 11. Función de densidad de probabilidad de falla. RUL y desviación estándar. Fuente: Elaboración propia.

La figura 11 representa el modelamiento bidimensional entre los datos de edad capturados en sistemas CMMS/EAM respecto a la de desgaste bajo la condición actual del activo. Representando, además, sobre ella la vida útil remanente y el grado de dispersión.

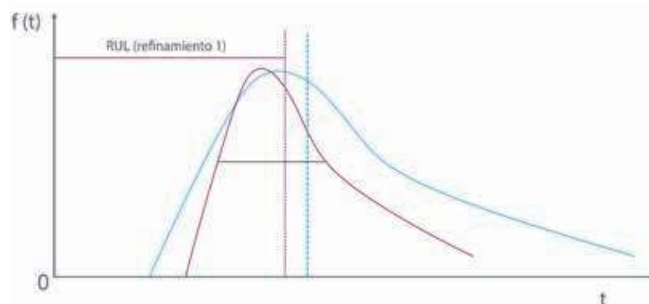


Figura 12. Primer refinamiento de la función de densidad de probabilidad de falla. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12, ocurre un primer refinamiento de la función de probabilidad de falla al mejorar la calidad de los datos de edad a través de la iniciativa propuesta (vinculación CMMS/EAM y RCM). El efecto de su correcta y completa definición provee una reducción significativa del margen de error en la estimación del RUL.

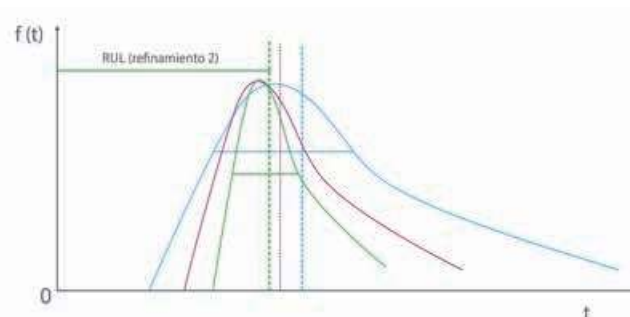


Figura 13. Segundo refinamiento de la función de densidad de probabilidad de falla. Fuente: Elaboración propia.

Surge un segundo refinamiento de la función de probabilidad de falla al incluir en el modelo una dimensión relevante correspondiente a las variables EHM significativas sobre la probabilidad de falla. Su resultado trae un efecto adicional de reducción del margen de error en la estimación del RUL (proceso Cox PHM).

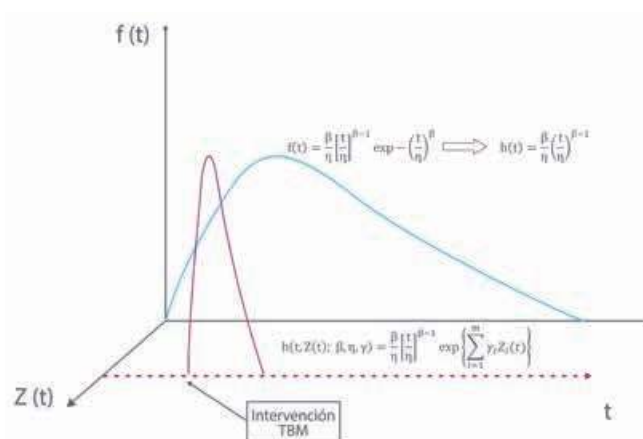


Figura 14. Análisis bidimensional de confiabilidad vs Análisis multidimensional (Cox PHM). Fuente: Elaboración propia.

El análisis de confiabilidad multidimensional de esta iniciativa da realmente sentido al CBM, lo que permite establecer una óptima estrategia TBM, justo antes de su rápido decrecimiento en confiabilidad en términos del RUL. Este análisis respalda la mejora sistemática de la gestión del mantenimiento a través de la toma de decisiones buenas y oportunas sobre las políticas de intervención.

CONCLUSIONES

- La estructura de los sistemas de información CMMS/EAM se centran en la planificación y la programación de los eventos de falla, la base de conocimiento RCM en la descripción precisa de eventos de falla probables y el entendimiento de sus comportamientos y sus consecuencias, mientras que el análisis de confiabilidad en modelamientos probabilísticos de futuros eventos de falla, llámese Cox PHM. La unificación e interacción de estos tres sistemas de conocimiento resulta en métricas de desempeño de alto nivel, las cuales se traducen en una mayor confiabilidad y disponibilidad de los activos físicos y en un mejor ROI para la organización.
- El empleo de variables EHM, conjuntamente con los de edad, fortalece el criterio de los gestores de la ingeniería del mantenimiento en orden para tomar decisiones acerca de cómo, cuándo y qué mantener. Combinando los modelos Cox PHM y Markov, podemos proyectar la confiabilidad futura basada en actuales tiempos de operación y estados actuales de las variables EHM.
- La ventaja de una política CBM sobre una TBM como estrategia de mantenimiento es que considera tanto a la edad del activo como el estado su condición, encriptado en variables EHM (hasta el momento de la toma de decisiones), cuya relación observada conducirá a predicciones precisas sobre futuros eventos de falla. Así, se maximizará la vida útil del activo y la rentabilidad del negocio.

REFERENCIAS

- [1] Abernethy, R. (2004). *The New Weibull Handbook*. Florida: Dr. Robert B. Abernethy.
- [2] Barringer, H. (noviembre, 1995). Where Is My Data for Making Reliability Improvements? *Fourth International Conference on Process Plant Reliability*, Texas, 14-17.
- [3] Birolini, A. (1999). *Reliability Engineering*. Berlin: Springer y Verlag.
- [4] Campbell, J., Jardine, A., y McGlynn, J. (2011). *Asset Management Excellence*. Nueva York: CRC Press.

- [5] Duffuaa, S. Raouf, A., y Campbell, J. (2000). *Sistemas de mantenimiento, planeación y control*. México D.F.: Limusa Wiley.
- [6] Jardine, A., Campbell, J., y Wiseman, M. (2001). *Maintenance Excellence, Optimizing Equipment Life Cycle Decisions*. Nueva York: Marcel Dekker.
- [7] Jardine, A., y Tsang, A. (2013). *Maintenance, Replacement and Reliability: Theory and Applications*. Nueva York: CRC Press.
- [8] Kalbfleisch, J., y Prentice, R. (2002). *The statistical analysis of failure time data*. New York: Wiley.
- [9] Mora, A. (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- [10] Moubray, J. (1997). *Reliability Centred Maintenance, RCM*. Carolina del Norte: Edwards Brothers.
- [11] Lugtigheid, D., Banjevic, D., Jardine, A. (enero, 2005). Component repairs: when to perform and what to do. *Annual Reliability and Maintenance Symposium*, Virginia, 398-403.
- [12] RIAC, Reliability Information Analysis Center (2010). *Reliability Modeling*. New York: RIAC.
- [13] Wiseman, M., y Lin, D. (2014). *Reliability-Centered Knowledge*. Nueva York: CRC Press.
- [14] Yang, G. (2007). *Life Cycle Reliability Engineering*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

ACERCA DEL AUTOR

David Alonso Nájar Valdivia

Ingeniero mecánico electricista. Con estudios de posgrado en ingeniería de mantenimiento y confiabilidad aplicada a la gestión de activos físicos en Perú, Colombia y Canadá, trasladando estos conocimientos a la industria minera, principalmente, como gestor de mantenimiento y confiabilidad operacional de equipos de planta en Perú y Colombia. Además de estos estudios de posgrado, también cursó, en España, estudios sobre ingeniería de *pipng*, con experiencia en diversos proyectos *pipng* en plantas termosolares, centrales térmicas, plantas de cogeneración, plantas de tratamiento de aguas, plantas petroquímicas, sistemas de distribución, entre otros, en España, Marruecos, Argelia y Portugal. Cuenta también con estudios de posgrado en *Business Administration* en la Universidad ESAN de Perú.

@dnajar@jarvax.com.pe