

# PREDICTIVA 21

## Avanzando hacia el futuro

Gerardo Trujillo

**14° Congreso de mantenimiento y confiabilidad México 2019**

**Aprender de otras empresas**

Las aerolíneas de bajo costo y la industria minera.

**Gerentes de mantenimiento**

Desafío que enfrentan dentro de las empresas

**Aplicación de un análisis RAM**

En un sistema de bombeo de agua cruda

# Índice

---

**3** Editorial

**5** **Entrevista a**  
Gerardo Trujillo  
*Irene González*

**9** **14º Congreso de**  
**mantenimiento y**  
**confiabilidad**  
*Staff Predictiva21*

**16** **¿Es el mantenimiento**  
**centrado en**  
**confiabilidad una**  
**tarea fácil?**  
*Brau Clemenza*

**20** **Análisis de mejoras**  
**en el mantenimiento**  
y explotación de un sistema  
industrial  
*Francisco Javier Martínez*

**34** **Aprender de otras**  
**empresas**  
*Victor Barrientos Boccardo*

**39** **Asociación técnica**  
**de la celulosa**  
**y el papel**  
*Mauricio Vernal L.*

**47** **Calculando la**  
**frecuencia óptima de**  
**inspección**  
*Edgar Fuenmayor*

**61** **Desafío que**  
**enfrentan** los gerentes  
de mantenimiento  
*Chris Struve*

**65** **El aprendizaje**  
**automático** y su  
aplicación en la industria  
*Irene González*

**70** **La otra visión de**  
**la confiabilidad**  
**operacional**  
*Jean farfán*

**84** **La industria y los**  
**protocolos de**  
**comunicación**  
*Irene González*

**88** **Aplicación de un**  
**Análisis RAM**  
*Geovanny Solórzano*



**Enrique González**  
Director

# El mantenimiento y la confiabilidad con miras al futuro

Editorial

**A** sistimos al 14º Congreso Latinoamericano de Mantenimiento y Confiabilidad, que se celebra desde hace 18 años en la ciudad de Monterrey. Fueron días de encontrarnos con antiguos amigos y de compartir con ellos anécdotas y la felicidad de participar en el encuentro, pero también una gran oportunidad para conocer cómo está la industria en otros países y unir experiencias para analizar lo que nos depara el futuro en la industria latinoamericana.

Estuvimos presentes no solo como medio de comunicación, sino como agentes activos de cambio, de ese futuro que todos tratamos de mejorar en la industria participando con la ponencia “Pasos para mejorar la eficiencia energética en turbocompresores de gas”, donde nos enfocamos en la importancia de la gestión de energía como parte de los procesos de mantenimiento y confiabilidad.

Esta edición #27 de Predictiva21 abre con una interesante entrevista a Gerardo Trujillo, en la que descubrimos al ingeniero y al ser humano, una pequeña muestra de ese extraordinario encuentro de conocimiento celebrado recientemente, como puerta de entrada, dando paso a interesantes temas enviados por nuestros articulistas colaboradores: “Aprender de otras empresas”, “La otra visión de la confiabilidad”, “Protocolos de comunicación en la industria”, “Desafíos que enfrentan los gerentes de mantenimiento”, “Aplicación de un análisis RAM en un sistema de bombeo de agua cruda”, “Calculando la frecuencia óptima de inspección considerando costos, riesgo y desempeño”.

La gestión de activos, el mantenimiento y la confiabilidad son temas que no terminan, cada día arrojan agradables sorpresas y mayores resultados para beneficiar a la industria, a nosotros como personas y a la humanidad.

**DIRECTORIO**

**Enrique Javier González Henríquez**  
Director ejecutivo y Editor  
enrique.gonzalez@predictiva21.com

**Andrés Enrique González Giraldo**  
Director de Finanzas  
andres.gonzalez@predictiva21.com

**Alejandro José Godoy Rodríguez**  
Director de Marketing  
alejandrogodoy@predictiva21.com

**Carlos José Villegas Álvarez**  
Director de Operaciones  
carlos.villegas@predictiva21.com

**Irene González**  
Directora Editorial  
irene.gonzalez@predictiva21.com

**María Goretti Fuentes Núñez**  
Diseño Editorial  
goretti.fuentes@predictiva21.com



**Cientos de activos en toda la planta.  
Cientos de empleados responsables  
de la producción.**

**Cuando un activo crítico comienza a fallar,  
su equipo necesita información clave para  
tomar la mejor decisión.**

# USTED PUEDE HACERLO

**Colabore en las decisiones claves en cualquier momento y en cualquier lugar.**

Mantener los programas de producción a menudo significa lidiar con lo inesperado – de forma rápida y precisa. Plantweb Optics de Emerson es un software de colaboración que conecta el equipo de producción a través de dispositivos móviles con información que es accionable y específica para cada miembro del equipo.

Para desbloquear comunicación en su planta visite **[Emerson.com/CollaborationSoftware](https://www.emerson.com/CollaborationSoftware)**.



The Emerson logo is a trademark and a service mark of Emerson Electric Co. © 2019 Emerson Electric Co.

**CONSIDER IT SOLVED™**



# Gerardo Trujillo

Gerardo Trujillo es el presidente del Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad, de la Asociación Mexicana de Profesionales en Gestión de Activos, del Comité Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento y director general de Noria Latín América. En estas líneas nos presenta su balance del Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad, sus aportes durante los catorce años de realización, habla sobre el futuro de la industria y nos permite conocer un poco más de su yo interior.

Irene González  
irene.gonzalez@predictiva21.com

---

Cuando hace dieciocho años nació la idea de organizar un lugar que fuera el punto de encuentro de los ingenieros latinoamericanos dedicados al mantenimiento, ¿cuál era la situación de la industria?

La situación del industrial en Latinoamérica era muy diferente a la que nos encontramos en este momento. Podríamos situarnos en un contexto en el que mantenimiento era, efectivamente, “el mal necesario” y un departamento que no aportaba y sí gastaba. Incluso en la gran industria había una gran dificultad para lograr establecer una visión de mediano y largo plazo que ligara la actividad de mantenimiento objetivo de la organización. El concepto de la confiabilidad prácticamente no existía como una actividad sistémica, multifuncional y holística.

La mayoría de las actividades de mantenimiento eran de tipo correctivo y basado en horas de operación o en tiempo. El mantenimiento predictivo comenzaba a tener su espacio y a ganar reconocimiento por su capacidad para anticipar la falla de los componentes. Con estas técnicas era posible evitar reparaciones costosas y que la planta se detuviera. La situación en la que el mantenimiento era efectuado en la industria, en realidad era una consecuencia de la falta de conocimiento, preparación y estrategia. Las carreras técnicas o de ingeniería el mantenimiento estaban en sus inicios en la mayoría de nuestros países. Todos los que se encontraban en ese momento trabajando el mantenimiento, basaban su desempeño en la experiencia y en cursos específicos seleccionados en sus necesidades inmediatas. La necesidad de educación y de guía era evidente y la falta de espacios para obtener ese conocimiento una realidad.

## P21: En los años de encuentros, ¿Cuál ha sido el aporte del Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad a la industria latinoamericana?

GT: El Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad ha ido evolucionando en el transcurso del tiempo. Inicialmente nos encontramos únicamente en mantenimiento y con el paso del tiempo y al despertar el interés de la industria hacia la confiabilidad, se logró hacer la sinergia entre estos conceptos para lograr ese objetivo común de una planta que pueda lograr los objetivos de la organización. Esa evolución nos ha llevado a configurar un congreso dirigido a la estrategia y a un selecto grupo de profesionales que tiene en sus manos su definición e implementación.

En lo personal, considero que el mejor logro del Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad Latinoamérica está en propiciar ese lugar donde se congregan tres elementos fundamentales para el crecimiento de nuestra industria. Tenemos a los especialistas, los expertos, los gurús, quienes, con su conocimiento y su visión nos indican un horizonte, son la brújula que nos indica el norte, hacia dónde va la tendencia, la tecnología. Tenemos a los usuarios, quienes nos comparten su día a día, sus experiencias, sus casos de éxito. Estos usuarios son quienes han escuchado a los gurús, a los expertos y han puesto en práctica esas nuevas visiones y estrategias y nos demuestran cómo esa visión se convierte en realidad, nos comparten cuáles fueron los pasos y factores de éxito, cuáles fueron los fracasos, cuáles son los obstáculos y de esa manera podemos encontrar ese círculo de retroalimentación entre la teoría y la práctica. El tercer elemento de este triángulo son los proveedores que dan la disponibilidad de las herramientas, los métodos y la tecnología. En el piso de exhibición está lo más avanzado, tanto en productos, métodos y en sistemas, lo que permite que quien tiene una visión disponga de los elementos para implementarla.

El CMC es el entorno ideal para esa integración. El piso de exhibición, la hora de las comidas y recesos propician el encuentro y la formación de relaciones personales y profesionales. Hemos formado una comunidad integrada y enfocada en mejorar y aprender. Además se han formado amistades más allá de lo profesional.

P21: Sabemos que la transmisión de conocimientos es uno de los objetivos principales del Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad. Nos gustaría que nos hablara de algunos ejemplos palpables de la influencia del congreso en los ingenieros latinoamericanos.

GT: El tema del aprendizaje también ha evolucionado de manera importante. Cada vez tenemos más herramientas y más posibilidades, tenemos libros, cursos, páginas web, -una revista tan importante como Predictiva 21-, que nos ayudan para conseguir conocimiento de la manera más fácil. Sin embargo, estamos convencidos que el conocimiento que se presenta en los congresos no está escrito en un libro y tal vez nunca lo estará.

La manera en la que hemos diseñado este congreso, permite el aprovechamiento máximo de la experiencia y conocimiento de todos quienes participan en él. Los cursos de los dos primeros días tienen el objetivo que proporcionar conocimiento técnico, capacitación y preparación de competencias profesionales. Algunos de estos cursos están enfocados a certificaciones internacionales que validan el conocimiento y las competencias. En los días de congreso, el aprendizaje se lleva a cabo a través de las sesiones que han sido diseñadas con tres enfoques diferentes: las sesiones BRÚJULA, conferencias de 45 minutos donde se muestra el rumbo a seguir y casos de éxito de quienes han transitado un camino. Se presentan conceptos disruptivos, tecnologías modernas, procesos y metodologías, innovación en sistemas y tecnología e investigación aplicada. Este tipo de conferencia establece el origen de la mejora, los fundamentos y la manera en que beneficia a los procesos, la seguridad, la ecología y el impacto financiero de su aplicación. Las sesiones SPARK son presentaciones cortas donde se muestra algo impactante que puede ser aplicable de inmediato. Esta sesión se vuelve una "chispa" que ayuda a detonar una mejora sustancial en la planta o en el conocimiento y habilidades del asistente. Su enfoque es "Cómo hacer". La sesión TOOLBOX es un taller práctico y aplicable 100% enfocado a proporcionar una habilidad, una herramienta o un método específico que el asistente pueda desempeñar al salir de la sesión. La sesión consiste en un 20% para la explicación del método y un 80% en la enseñanza de este, incluyendo una práctica o el acompañamiento a los asistentes para que lo puedan hacer ellos.

El enfoque es que todas las sesiones aporten conocimiento práctico, aplicable en un tiempo razonable y de alto impacto. No hay temas teóricos o venta de productos en las sesiones. Se ha conformado un comité técnico que evalúa de manera objetiva cada propuesta para asegurar que las sesiones se alinean con los resultados de las investigaciones de mercado que determinan qué es lo que nuestro participante desea. El aprendizaje está diseñado para que el participante reciba lo que quiere aprender.

P21: ¿Por qué es importante, a su modo de ver, este intercambio, si cada país tiene su proceso y su propia visión del área industrial?

GT: Estamos cada vez más inmersos en una economía global donde competimos, no solo con las empresas de nuestro

propio país, sino también con otras latitudes. Las máquinas tienen un solo lenguaje y los objetivos de tu planta industrial están centrados en el máximo retorno sobre la inversión. Debemos eliminar de nuestras mentes esa idea de que somos economías subdesarrolladas del tercer mundo. Somos profesionales que gestionamos nuestro destino y debemos prepararnos para competir en igualdad con las potencias industrializadas. Los principios del mantenimiento y la confiabilidad implican el alinearse con el contexto operacional, esa podría ser la variable principal en la que se base cualquier concepto de diferenciación en los procesos de mantenimiento y confiabilidad. El enfoque de los profesionales que diseñan e implementan la estrategia en sus plantas debe ser el de alinear los procesos y los resultados de su gestión a los objetivos de la organización y de esta manera conseguir los objetivos del sistema de gestión de activos.

Los principios de la ingeniería no se definen por país o por región, sino que son leyes universales que nos corresponde a nosotros encontrar la manera de utilizarlos para la optimización de los resultados.

**P21: Estos conocimientos, los principios de mantenimiento y confiabilidad, ¿pueden aplicarse a cualquier otra área diferente a la ingeniería?**

GT: Mantenimiento es uno de los procesos dentro del ciclo de vida de un activo y de hecho, utiliza muchos de los principios de la ingeniería, la estadística, planeación, proyectos, programación de otras áreas. El conocimiento es universal y nos corresponde identificar cómo sacarle el mejor provecho.

**P21: ¿Cómo?**

GT: La gestión de proyectos de acuerdo con el PMI, la utilización de las herramientas de manufactura esbelta, las habilidades financieras, las habilidades blandas generalmente utilizadas en la parte administrativa, los datos y la información de operación, procesos, calidad, etc. Son sólo algunos ejemplos de estas herramientas universales que se utilizan de manera transversal en diferentes procesos de la organización, incluyendo mantenimiento.

**P21: Luego de estos años escuchando casos de los países latinoamericanos, sus procesos y además enseñando a las generaciones de relevo, ¿cuál es el panorama para la industria en materia de mantenimiento y confiabilidad?**

GT: El panorama es de retos y oportunidades. Los retos vienen acompañados de la transformación tecnológica de la



## El profesional y el humano

### *El disfrute y el relax...*

GT: Acabo de cumplir 60. Lo recibo con mucha alegría, agradeciendo lo vivido y con gran ilusión me preparo para lo que viene. Celebro la oportunidad de hacer lo que me gusta y me apasiona. Aunque mi agenda sigue intensa, cada vez disfruto más mis viajes y me doy el espacio para estar y viajar con mi familia y amigos (que están distribuidos estratégicamente en todo el mundo). Disfruto la música clásica y la ópera, pero también jazz, pop, rock y el mariachi. Cocino cada vez que puedo, pues gracias a mis viajes he aprendido técnicas y recetas de platillos deliciosos. Justo ahora me encuentro descubriendo las delicias de la técnica "Sous Vide". Me apasiona el vino y me falta tiempo para aprender más y beber más. Entre comida, vino y trabajo busco el equilibrio con el ejercicio.

### *El mantenimiento y la confiabilidad como filosofía de vida...*

Tengo ya más de 15 años corriendo, ejercitándome y alimentándome sanamente como un estilo de vida. He corrido 8 medios maratones y muchas carreras de menor distancia (en mi maleta siempre hay un par de zapatos de correr). Por ello organizamos la "Carrera de la Congruencia" en los CMC. Para poder darle

industria 4.0 y la automatización. Muchas tareas actuales del mantenimiento serán reemplazadas por sistemas automáticos, procesos analíticos gestionados a través de inteligencia artificial, la inteligencia de las máquinas, algoritmos y decisiones en las que el hombre no interviene. Actividades cotidianas del mantenimiento como inspecciones, colecta de datos, análisis de información, diagnóstico y pronóstico, con el paso del tiempo serán ejecutadas por sistemas y robots. Estas plazas se perderán.

Para que esto ocurra, se deberá trabajar en la implementación de estas estrategias, sistemas y procesos. Se requiere de especialistas en el manejo de datos, instalación de hardware, desarrollo de sistemas analíticos que realicen la prognosis y los algoritmos de decisión ante condiciones normales. Las oportunidades en el área de mantenimiento se amplían hacia áreas poco tradicionales como la informática, big data, estadística y programación.

## P21: Específicamente, ¿cuál es el panorama en México?

GT: México pasa por una transición política nunca vista. En el horizonte se visualizan dos escenarios: el de la industria privada y el de la industria pública. En el primer caso, el avance tecnológico impulsado por Industria 4.0 llegará primero en la manufactura y en la industria automotriz, para gradualmente incorporarse en otras aplicaciones.

En el caso de las empresas del gobierno, la nueva administración ha optado por dar marcha atrás a las estrategias modernas de mantenimiento y confiabilidad para presentarle al pueblo un ahorro. Sabemos que este enfoque significa un ahorro mal comprendido que se suma al deterioro casi negligente del gobierno anterior, que prácticamente eliminó los presupuestos de mantenimiento de la industria nacional. Los proyectos que habían sido implementados en los últimos 15 años han perdido al soporte y vemos con tristeza un grave riesgo en el sostenimiento de la infraestructura. Las nuevas macro inversiones no están considerando una visión holística donde se incorpore el ciclo de vida de los activos y mucho menos considerando la normativa internacional ISO 55.000.

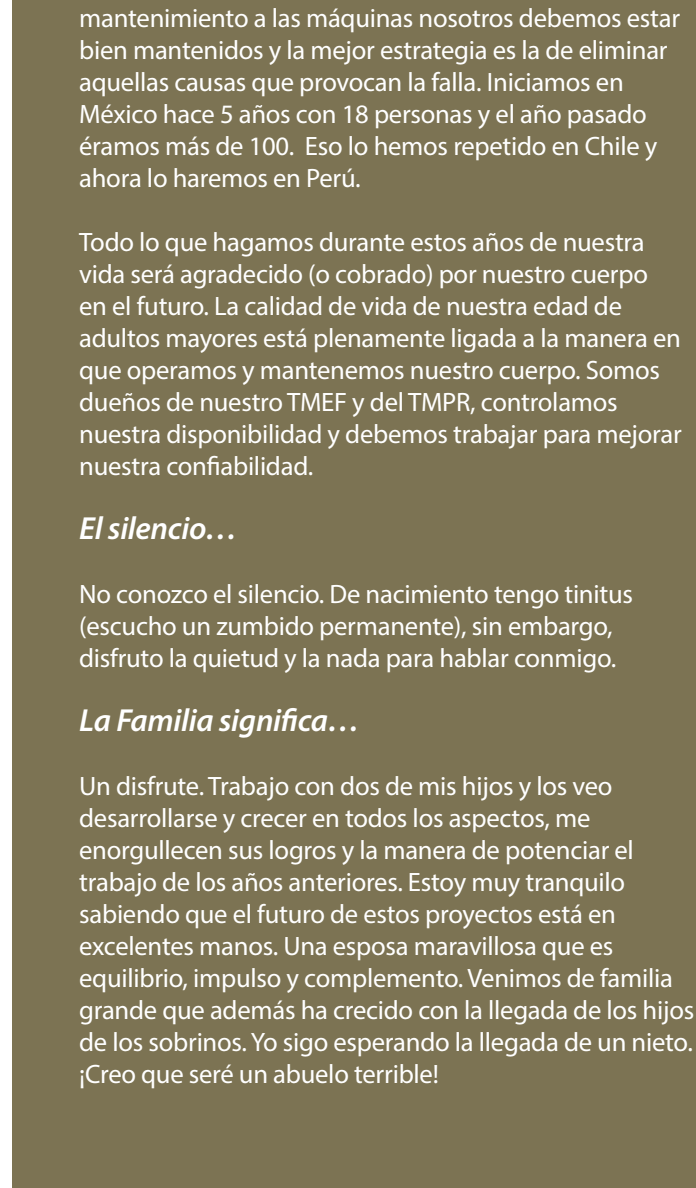
El reto para los profesionales que trabajan la industria pública será el de educar a quienes ahora tienen en sus manos el diseño de la estrategia.

## P21: ¿Cómo visualiza el CMC los retos para incorporarse a tiempo en la carrera del internet de las cosas y la industria 4.0?

GT: El CMC incorpora el Internet de las cosas como una temática importante dentro del programa técnico, además de la presencia en el piso de exhibición de gran cantidad

de instrumentos, tecnología y software enfocado al mantenimiento basado en condición, predictivo y prescriptivo. Como todos los procesos novedosos, Mantenimiento 4.0 nos parece muy atractivo, pero de acuerdo con la teoría de la curva de expectativas de Gartner, muchos de los beneficios aparentes están inflados y llegará el momento en el que se establezca su real valor.

Este año se presentan por lo menos seis casos de estudio de implementación exitosa de mantenimiento 4.0 y esperamos ver tecnología cada vez más accesible y estandarizada en cuanto protocolos de conexión y seguridad.



### *El silencio...*

No conozco el silencio. De nacimiento tengo tinitus (escucho un zumbido permanente), sin embargo, disfruto la quietud y la nada para hablar conmigo.

### *La Familia significa...*

Un disfrute. Trabajo con dos de mis hijos y los veo desarrollarse y crecer en todos los aspectos, me enorgullecen sus logros y la manera de potenciar el trabajo de los años anteriores. Estoy muy tranquilo sabiendo que el futuro de estos proyectos está en excelentes manos. Una esposa maravillosa que es equilibrio, impulso y complemento. Venimos de familia grande que además ha crecido con la llegada de los hijos de los sobrinos. Yo sigo esperando la llegada de un nieto. ¡Creo que seré un abuelo terrible!

Sin embargo, el CMC mantiene un equilibrio con los temas de liderazgo, financieros, técnicos, tácticos y estratégicos que son necesarios para mantener y mejorar nuestros procesos actuales.

Todo lo que hagamos durante estos años de nuestra vida será agradecido (o cobrado) por nuestro cuerpo en el futuro. La calidad de vida de nuestra edad de adultos mayores está plenamente ligada a la manera en que operamos y mantenemos nuestro cuerpo. Somos dueños de nuestro TMEF y del TMPR, controlamos nuestra disponibilidad y debemos trabajar para mejorar nuestra confiabilidad.



# 14<sup>o</sup> Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad

## Una ventana de conocimiento y oportunidades



Staff Productiva21

Jueves 11 y viernes 12 de septiembre  
Hotel Crown Plaza, Monterrey

**G**estión de activos, confiabilidad, mantenimiento, eficiencia fueron los conceptos objeto de discusión, análisis, aprendizaje y actualización durante los dos intensos días en los que el Congreso Latinoamericano de Mantenimiento y Confiabilidad, en su edición número 14, abrió sus puertas para el encuentro de especialistas, técnicos y asesores. Más de 500 participantes, principalmente de países latinoamericanos, se dieron cita en el Crown Plaza de la ciudad de Monterrey para escuchar las ponencias de los expertos y sumarse a los talleres donde actualizaron y aprendieron nuevos conceptos con vista hacia la optimización y la potenciación de recursos en la industria.



Gerardo Trujillo, presidente del Congreso, dio la bienvenida a todos los participantes agradeciendo que cada día se suman más en el interés de cubrir las necesidades de la industria a nivel mundial.

“ Los profesionales de mantenimiento y confiabilidad poseen una variedad de atributos, experiencia, certificaciones, competencias profesionales y una reputación de éxito. ¿Cuáles son las áreas indispensables a desarrollar? ¿Cómo encontrar el balance óptimo entre variedad y profundidad de conocimiento? ¿Cuál es la diferencia entre un profesional de mantenimiento y un profesional de confiabilidad? ¿Necesitamos profesionales híbridos? ¿Debo evolucionar de mantenimiento a confiabilidad y después a gestión de activos como parte de mi carrera profesional? Estas preguntas forman parte del cuerpo central de esta presentación donde presentaremos nuestra visión desde una perspectiva holística, normativa y de desarrollo profesional. Nuestro objetivo es tener una visualización más clara de las áreas de mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos. Identificar la tendencia a nivel mundial de cada profesión, las áreas de oportunidad que tienen y el valor de cada una de ellas en la organización”.

Tres expertos, José Durán, Carlos Mario Pérez y Santiago Sotuyo, entre otros especialistas se sumaron a esta bienvenida para orientar a los asistentes hacia las más de 40 ponencias simultáneas que formaron parte de esta estructura, dando herramientas a los participantes para dirigir su aprendizaje y aprovechar al máximo el evento.



**Ing. Carlos Mario Pérez**

**¿Quiere mejorar la confiabilidad de sus activos? Mejore integralmente los planes de mantenimiento – Brújula**

Un plan de mantenimiento es un calendario que define las fechas en las que se deben realizar las actividades estándar o sistemáticas asociadas a un activo, y su objetivo es mejorar el desempeño de los mismos. Con el fin de garantizar que estas estrategias son adecuadas, completas, basadas en causas de falla y coherentes con el contexto operacional actual, deben ser sometidas a revisión y ajustes periódicos con un proceso que permita un enfoque objetivo y replicable. Se considera que las tareas de un plan de mantenimiento son adecuadas si al ejecutarlas el activo es más confiable.



**Ing. Gerardo Lara**

**La integración de indicadores de desempeño dentro del manejo de activos en minería – Brújula**

Los modelos de excelencia operacional de procesos son guiados por indicadores de desempeño de activos críticos, estos se vuelven elementales para lograr identificar las oportunidades de optimización de procesos de producción. Diseñar modelos de gestión que realmente generen valor, requiere desde el análisis de manejo de activos, la estructura necesaria para asegurar el cumplimiento de la administración, estos indicadores deben de evitar el ciclar la administración y orientar hacia los objetivos planteados al tener estas herramientas de medición. Se busca que después de la conferencia se genere sinergia para compartir mejores prácticas y generar línea base para estándares elevados en manejo de indicadores y gestión de activos.



**Ing. Jesús M. Laboy**

**Mantenimiento basado en condición bajo la economía de los intangibles – Brújula**

Nuevas tecnologías y capacidades denominadas comercialmente como la Industria 4.0 han dado un nuevo aire al tema de mantenimiento basado en condición (mantenimiento predictivo). ¿Qué debemos tener preparado para que estas tecnologías escalen valor, no problemas? Que debe estar en función en nuestro programa de MBC para habilitar la escalabilidad necesaria que la industria 4.0 requiere para entregar valor.



**Ing. Tibaire Depool**

**Identificación de aspectos clave para la excelencia operacional – Brújula**

La innovación va mucho más allá de solo generar ideas, por lo que es importante invertir en el proceso completo de las acciones que las empresas llevan a cabo. Estos procesos deben realizarse de la mejor forma posible y optimizando todos los aspectos que los componen, para llegar a conseguir la excelencia.

# Ponentes



“Resalto la importancia y necesidad de que trabajemos interdisciplinariamente, que estos congresos no se limiten a ingenieros sino que se extienda a los temas de finanzas, costos, incluso marketing y, más que nada, los problemas humanos. Si yo hablo solo con mis colegas ingenieros también aprendemos, pero aprendemos siempre más de lo mismo. En cambio, aparece un sociólogo y agrega una nueva dimensión a nuestras ideas, a nuestros trabajos, a nuestra creatividad y a mi me parece importante y muy útil”.

**Ing. Henry Ellmann**  
Fundador, presidente y CEO de Ellmann Sueiro



“Estos congresos fundamentalmente tienen una misión de abrir las puertas a la comunidad de profesionales y técnicos de mantenimiento y confiabilidad para actualizarse en las novedades técnicas, en las novedades de gestión, en las nuevas herramientas que hay y las mejores prácticas, una manera de generar un ámbito de compartir conocimiento, desarrollar capacidades, tender redes, hacer networking y también hacer negocios”.

“Esencialmente la ingeniería de mantenimiento apunta hacia ese control en cuanto a la planificación y ejecución del trabajo, ese soporte de ingeniería a los técnicos que ejecutan el trabajo. Por otro lado, la ingeniería de confiabilidad, que antes era mucho más de diseño, o sea, había estudios de confiabilidad en algunas universidades, pero más orientado a diseño de producto, por ejemplo, hoy en día se ha expandido a diseño de planes de mantenimiento.

“Actualmente, en lo que nos compete ahora, la confiabilidad tiene que ver con asegurar desde el diseño de los equipos durante la instalación, puesta en marcha y, durante toda la instalación, durante



¿Por qué inventar la rueda? ¡Vamos a mejorarla!  
No inventemos la rueda. Muchas veces me encuentro plantas que están inventando. Los congresos nos ayudan a compartir ideas. Muchas veces pensamos que algo es una idea innovadora y cuando venimos a estos congresos vemos que hay otros haciendo lo mismo, y, ¿Por qué inventar la rueda si la rueda fue inventada? Por qué no venimos a escuchar, a compartir ideas, a hacer este network donde si tengo problemas en mi planta, el vecino tiene los mismos problemas. Exhorto a la industria a que asistan a estos congresos, que todos los días están surgiendo cosas nuevas y esa relación con personas en la misma industria que nos pueden ayudar.

**Ing. Félix Laboy**  
Presidente de Vibra





El ingeniero Gyogi Mitsuta compartió con Predictiva21 su opinión acerca de la importancia de realizar este tipo de eventos para la industria y su visión de la gestión de confiabilidad y mantenimiento en Venezuela. "La vía para rescatar siempre parte de formar. En Venezuela estamos haciendo la mayor puesta de corazón para brindar formación en un país donde hay una migración lamentable. Desde mi área de control estamos dispuestos a brindar el apoyo y el entusiasmo a profesionales para que se formen. Creemos que con ánimo y una buena formación podemos salir adelante".

"El mejor marketing para la energía es decir que la energía es la manifestación de energía, es la condición de la máquina, entonces, así como hablamos de temperatura deberíamos estar hablando hoy de que la eficiencia es una condición y está manifestando el equipo y por eso es que tenemos que monitorear la energía".

**Ing. Gyogi Mitsuta**

toda la operación y hasta el encarte final que todo el equipo tenga el óptimo plan de mantenimiento de acuerdo al balance tiempo, riesgo, costo, desempeño que corresponda a cada contexto operacional. Como el contexto operacional es cambiante, el contexto de negocios es cambiante, entonces necesitas un proceso de gestión de ingeniería de confiabilidad o de gestión de estrategias de activos, como en Arms les llamamos, porque justamente esas estrategias, si yo quiero estar en el óptimo siempre, alguien tiene que estar evaluando año a año si estamos en el óptimo y ese es el rol del ingeniero de confiabilidad. Bien distinto del rol del ingeniero de mantenimiento que se enfoca en lograr hacer más eficiente el cumplimiento del plan de mantenimiento".

**Ing. Santiago Sotuyo**  
Gerente de Ingeniería América Latina de Arms Reliability



"Creo que las organizaciones en Latinoamérica están madurando más, entendiendo o ubicando cada proceso y cada rol. Separando muy bien lo que es el proceso de gestión de activos y el proceso de gestión de mantenimiento, el uso y la potenciación de todas las herramientas de optimización y en eventos como este, tenemos la visión de muchos expertos en estas áreas y generan argumentos que indistintamente pudiésemos no tener coincidencias, pero lo importante es tomar lo mejor de las distintas posiciones y generar un camino de optimización para el área de mantenimiento.

**Ing. Carlos Parra**  
Gerente General en INGECON



"La pérdida de eficiencia de los equipos, y en particular de los turbocompresores, es parecida a las enfermedades asintomáticas del cuerpo humano, como la hipertensión por ejemplo: puedes sufrirse sin que se sepa que se tiene. Existe la posibilidad cierta de que nuestros activos cumplan con sus funciones principales y sus objetivos de producción, pero a un costo energético mayor al previsto por diseño, sin que este modo de falla sea detectado oportunamente, a menos que se incluya de manera expresa la medición de la eficiencia energética como una técnica del mantenimiento predictivo y como un indicador clave del desempeño. En el caso particular de México, donde el precio del combustible es bastante elevado, tenemos que los costos energéticos en el ciclo de vida de los turbocompresores, llevados a valor presente, son aproximadamente el doble del costo capex del activo y, probablemente, de 2 a 3 veces el costo de mantenimiento. De aquí la importancia que tiene incorporar y masificar esta técnica predictiva y la gestión energética en la gestión de los turbocompresores, incluyendo turbogeneradores. Sólo en México la aplicación adecuada de la gestión energética en el parque turbinas a gas instalado podría generar ahorros potenciales anuales del orden de US\$ 500 millones. Esto equivale a la construcción de una nueva planta de generación eléctrica de 500 MW cada año, o a la renovación y/o modernización del parque turbogenerador existente en varios años.

**Ing. Enrique González**  
Director principal de E&M Solutions / Fundador, CEO y Director de la revista Predictiva21



El Congreso Latinoamericano de Mantenimiento y Confiabilidad, además de ser un encuentro para el conocimiento, fue el lugar para renovar antiguos vínculos de amistad, entrelazar nuevas relaciones y establecer oportunidades de negocios.

## Expositores



Las empresas que participaron en la Expo CMC México 2019, que se llevó a cabo en el Pabellón Monterrey, dejaron conocer su opinión a través de sus representantes.



**Oscar Trujillo**

Estamos muy contentos con los contactos que hemos podido realizar. El objetivo del congreso además de comunicar, transmitir conocimientos y experiencia a través de las conferencias es crear comunidad. A través de los años las personas han podido crear lazos más estrechos. Sirve para encontrar los servicios las empresas ofrecen con el objetivo general de aumentar los estándares de mantenimiento en el país.



**Johanna Durán**

Este congreso tiene una estructura de presentar tres tipos de actividades: las conferencias Spark, Brújula y Toolbox. Está muy bien orientado para que los participantes sepan a dónde quieren direccionar su aprendizaje. Venimos a este tipo de eventos principalmente para darnos a conocer. Es una gran oportunidad para mostrar lo que hacemos. Este tipo de eventos siempre va a fortalecer la relación entre las partes.



**Diego Hernández**

Venimos cada año ya que en este congreso coinciden personas de distintos departamentos como confiabilidad, mantenimiento y gestión de calidad donde PRUFTECHNIK encuentra oportunidades para apoyar en las soluciones de las necesidades de estas personas.



**Fabián Mendoza**

Es un congreso donde se reúne a toda la expertise del mundo de mantenimiento y confiabilidad. El número de asistentes nos ha ayudado a conocer una experiencia en cuanto a las necesidades del Mercado en el mundo de mantenimiento.



**René Berumen**

Este congreso ha crecido mucho desde las ediciones anteriores. Hemos tenido buenas experiencias con clientes y otros expositores. Las ponencias han sido excelentes, muchas cubriendo las tecnologías emergentes. Es un congreso donde asiste personal calificado. Estamos contentos de haber podido participar.

“

Creo que CMC es uno de los congresos más top a nivel regional, sin duda, pero probablemente a nivel mundial en cuanto a alineación de las necesidades de la gente que viene a los congresos y de la oferta de conferencias y stands de proveedores que hay en la Expo, compite a nivel mundial, sin duda alguna.

Santiago Sotuyo  
Arms Reliability

## Participantes

Los participantes en el evento dejaron testimonio del éxito del Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad y la importancia que de manera personal y para la industria de cada uno de sus países representa.



**Jose Juan Alvarado**  
Sistemas Automotrices  
de México

Me pareció muy interesante la distinción que se hace entre mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos en este congreso. Estoy más enfocado al área de mantenimiento y gestión de activos, también en adquirir herramientas y conocimientos para poder administrar mejor los recursos que tenemos disponibles en la empresa para poder ser más eficientes y poder cumplir con la labor de mantenimiento que tenemos asignada.



**Manuel Gruinal  
Hubbel**

La intención de venir al congreso es la de actualizar mis conocimientos en el área. Actualmente estamos implementando un software para la programación de los servicios, mantenimiento y gestión de activos. Yo creo que el núcleo de la exposición para estos dos días va muy enfocado a estos temas. Agradecemos la oportunidad y espero poderle sacar provecho.



**Jorge Blanco**

Vine al congreso con buena expectativa de evolucionar en cómo desarrollamos el mantenimiento de los equipos en la empresa. Busco identificar el nivel de mantenimiento que desarrollamos. He visto las expectativas de a dónde podemos llegar y las mejoras que podemos desarrollar con nuestro equipo de trabajo, para conseguir una mejor confiabilidad, mejorar nuestro desarrollo y cumplir con nuestro plan de proceso y producción. Sobre todo, como desarrollar el conocimiento y como medirnos, así como ubicarnos en que hacemos y dejamos de hacer para conocer en qué estamos fallando.



**Raúl Alcanta  
Michelin**

Este congreso es muy importante ya que es el lugar para poder actualizarse en todo lo que está relacionado con mantenimiento. Soy líder del área de mantenimiento. Aquí en este congreso encontramos empresas que manejan la información y tecnologías para mejorar la gestión de mantenimiento. Los cursos y los talleres han estado muy interesantes, orientados a las diferentes responsabilidades. Las conferencias incluyen temas muy importantes. Es buen momento para traer al equipo de trabajo para que adquieran ideas y puedan aplicarlas.

**Para los asistentes al Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad, este representa un evento que extiende sus brazos para expandir el conocimiento a través del mundo y que desde ya genera grandes expectativas por conocer los ponentes y temas que se analizarán en la próxima edición, año 2020.**

**25 - 28 NOVIEMBRE 2019**  
**SWISSOTEL | LIMA, PERÚ**

*El foro que reúne a profesionales de la industria en Latinoamérica*

Cursos especializados con las mejores prácticas de mantenimiento, gestión de activos y confiabilidad industrial.

Nuestra metodología se enfoca en lograr un impacto potente y medible. Compartiremos conocimiento experto mediante talleres que te permitirán desarrollar el mayor número de habilidades, herramientas y métodos en mantenimiento y gestión de activos.



**SESIONES 100% PRÁCTICAS Y DINÁMICAS**  
(DURACIÓN 30 ')

De aplicación inmediata, para impulsar y gestionar proyectos de corto plazo.



**SESIONES DE PROFUNDIDAD MEDIA**  
(DURACIÓN 45 ')

Enfocada en analizar casos de éxito y mejores prácticas de la industria. Podrás indentificar y definir las acciones para mejorar tu empresa, programa o procesos.



**TALLERES 100% PRÁCTICOS**  
(DURACIÓN 90 ')

Enfocada en analizar casos de éxito y mejores prácticas de la industria. Podrás indentificar y definir las acciones para mejorar tu empresa, programa o procesos.



**IAM (Institute of Asset Management)**  
**IAM CERTIFICATE®**

El certificado reconoce internacionalmente el conocimiento y entendimiento de un individuo sobre Gestión de Activos



**ICML (International Council for Machinery Lubrication)**

Certificaciones MLT, MLA y MLE



**CONGRESO DE  
MANTENIMIENTO  
& CONFIABILIDAD**  
**PERÚ**

*Te impulsa profesionalmente e impacta de forma positiva a tu empresa por medio de conferencias, mejores prácticas, talleres de simulación y casos de éxito.*

**10 CURSOS  
ESPECIALIZADOS**

Formación profesional de la mano de los expertos



**+35 CONFERENCIAS  
PARA ESCOGER**

**SPARK - BRÚJULA - TOOLBOX**  
Para descubrir nuevas y útiles herramientas que generarán valor y aumentarán la confiabilidad de tus equipos.

**2 CERTIFICACIONES  
INTERNACIONALES**

Validación internacional de competencias y conocimientos



**+30 EMPRESAS  
EXPOSITORAS  
PROVEEDORES ESPECIALIZADOS**

**SOLICITA MÁS INFORMACIÓN:**

✉ [contacto@cmc-latam.com](mailto:contacto@cmc-latam.com)

☎ +52 477 711 23 23



# ¿Es el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad una tarea fácil?

Una estrategia de mantenimiento creada en la década de los cincuenta toma relevancia en el presente para desarrollar técnicas de mantenimiento preventivo que permitan analizar el comportamiento de los equipos en función de mejorar la operatividad de las empresas.



## Brau Clemenza

Consultor, Investigador, Docente y Articulista  
 www.sistemademantenimiento.com  
 brclementia@hotmail.com

**D**esde hace pocos años se viene hablando con mucha fuerza del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC); sin embargo, esta estrategia de mantenimiento no es realmente nueva y su origen fue en los años 50 y, posteriormente, se amplió al campo aeronáutico donde nace el MCC y toda su normativa MIL-STD-1629, SAE JA2011. En uno de los artículos de la revista @Predictiva21 comentaba que si “Ud. no construye su filosofía de trabajo de mantenimiento, ninguna estrategia que utilice será completa”. La razón radica en que no hay dos empresas iguales aun cuando su proceso productivo sea el mismo; simplemente, porque realmente las culturas de mantenimiento tampoco son iguales. Usted puede tener una planta en Bangladesh y otra en Alemania y sus disponibilidades: globales, por falla, por mantenimiento preventivo o por mantenimiento operativo, seguramente serán muy diferentes y con una gran desviación. Todos los que están relacionados con el área de mantenimiento saben que un alto porcentaje de empresas no tiene gente que monitoree el desempeño de los equipos. Levantar el comportamiento de su equipamiento toma su tiempo y mucho más su análisis, debido a que la gente anda en su día a día evitando que el equipamiento falle lo menos posible y si esto ocurre, que el restablecimiento operacional sea lo más rápido posible. Hace más de 25 años me tocó gerenciar un proyecto de reforzamiento y reingeniería del mantenimiento en dos grandes complejos químicos-petroquímicos, elaborando Failure Modes Effects Criticality Analysis (FMECA(s)), Preliminary Hazard Analysis (P.H.A(s)) y construcción de Fault Tree Analysis (F.T.A(s)), definiendo criticidades. El tiempo invertido fue un poco más de un año; se consumieron más de 150.000 horas-hombre de ingenieros y técnicos en consultoría para un poco más de 20 plantas. Realmente fue un trabajo extremadamente laborioso. Ahora bien, porqué les comento todo esto, sencillamente porque la empresa no supo aprovechar toda esta información; la razón era, la debilidad en su cultura de mantenimiento. Retomando el inicio de este artículo, tener una persona

**No hay dos empresas iguales aun cuando su proceso productivo sea el mismo, simplemente, porque realmente las culturas de mantenimiento tampoco son iguales.**

o grupo de personas para levantar esta información, como hemos visto, toma su tiempo, cuánto, no lo sé porque depende de la cantidad de equipos, la cantidad y disponibilidad de gente que va a realizar el trabajo, logística para hacer el trabajo, tipo de proceso, accesibilidad, duración de la falla, tipo de falla (progresiva, cataléptica, modos de fallas, causas, impactos, etc.), arreglo o arquitectura de la posición funcional (spare), etc. Muchas veces se piensa que todo termina allí, posiblemente estemos errados; porque cuando Ud. levanta en una posición operacional: “la(s) función(es) del equipo, sus modos de fallas, sus causas y sus impactos negativos cuando estos fallan”, tiene que tener claro que los equipos no están siempre en una misma posición, a menos que sean equipos estáticos y aquellos rotativos de gran tamaño que tengan que repararse en sitio, pero aquellos otros rotativos medianos o pequeños como bombas, motores y otros no rotativos como válvulas, cuando estos fallan salen de esa posición funcional, y posiblemente sean reemplazados por otros debido a la criticidad de la posición, ésta(s) no puede(n) quedar desasistida(s). El activo dañado es llevado al taller para su intervención; en este momento no profundizo en qué se pueda reparar en sitio. Por ejemplo: para el caso de una bomba, ya sea el activo completo, o componente motor, o componente bomba, solo que son removidos del sitio para su reparación y que hay un cambio de serial en la posición, para el conjunto motobomba si es monoblock, o cualquiera de sus partes (motor/bomba), si no lo es.

Todos sabemos que para estos equipos que llamo viajeros como bombas, motores, válvulas, etc. lo crítico es la posición no el equipo mismo, porque cuando éstos son removidos no se llevan la criticidad, ella queda en el sitio. Un gran cuidado se debe tener al momento de seleccionar un software de mantenimiento debido a que el mismo debe permitir despegar un equipo internamente en el manejo de la información, con un serial particular de una posición y



“ La estadística trata con valores determinísticos y probabilísticos y en nuestro trabajo debemos manejar ambos”

reemplazarlo con otro de diferente serial, pero técnicamente igual para colocarlo en la posición desasistida o fallada. “Recuerden siempre, sólo para aquellos equipos que puedan ser removidos y sustituidos por otros” y que requieren también ser registrados y monitoreados en el histórico del equipamiento a través de la orden de trabajo y tener la información de dónde han estado, cuánto tiempo han estado en el sitio y cómo se han comportado, etc. En consecuencia, el nuevo equipo reemplazado posiblemente tenga modos de fallas o causas diferentes, aun cuando cumpla la misma función, entonces también debería ser objeto de análisis RCM. Ya hemos visto lo laborioso de este trabajo, lo más recomendable es hacer un joint-venture o alianza estratégica con un consultor y con una o dos personas de la planta, con amplio conocimiento del comportamiento del equipamiento según las situaciones o argumentos indicados al inicio de este artículo y, progresivamente, ir construyendo todo este andamiaje técnico. En otro de mis artículos, que escribí en esta tan importante revista @PREDICTIVA21, que llamé “El Papel del Consultor o un Consultor de Papel”, encontrarán herramientas para su selección. Una vez establecida esta alianza, iniciamos la tarea ya sea por áreas, equipos críticos, secciones, sistemas o instalaciones, hasta abarcar toda la planta. Esta actividad nos servirá también para actualizar el registro de activos de mantenimiento de la empresa.

Siguiendo con mi exposición, igualmente conseguir o encontrar personas que trabajen en el área de estadística en una empresa, tampoco es fácil. La mayoría de las personas cuando hacen sus carreras de ingeniería no son de agrado de la estadística; ahora bien, ¿cómo pueden centrarse en analizar información de tipo estadístico si no sienten pasión por la materia? Posiblemente para no complicarse, se apoyen con algún software de mantenimiento que haga esta tarea. Sin embargo, cuando queramos hacer un análisis muy particular los invito a manejar los “Papeles Funcionales” para los cálculos, tanto de parámetros como valores de confiabilidad,

esa es mi recomendación. Soy de las personas que creen que no debemos desechar esta metodología porque para mi apreciación, permite hacer un análisis más cuidadoso del comportamiento de un equipo, no olvidemos que la estadística es así porque trata con valores determinísticos y probabilísticos y en nuestro trabajo debemos manejar ambos. Para ello, con la utilización de “Papeles Funcionales” podemos acercarnos más a la determinación de un valor cuando linealizamos los puntos sobre un papel funcional, descartando unos y aceptando otros y así construir una recta sobre estos papeles que nos permita encontrar el valor deseado; por ejemplo: determinar un valor de un parámetro de forma ( $\lambda$ ), podemos conseguirlo en un papel logarítmico “Log-Log” de dos ciclos. Se llama así porque se trabaja con dos o tres ciclos, según sea el caso y en ambas escalas dependiendo lo que se desea encontrar. También existen los papeles semilogarítmicos muy usados en la gestión de inventarios.

Quisiera concluir con este artículo preguntándoles: ¿es una tarea laboriosa?, lo dejo a su criterio; pero lo más importante es que lo que vayamos a acometer lo hagamos de la mejor manera, con mucha mística y organización para que la estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad no se pierda. Aprovecho la oportunidad para dejarles mi máxima: “No se puede mantener lo que no se conoce y si se conoce hay que saber cómo hacerlo”. Tenemos que tener claro hacia dónde vamos a remar y sobre todo, para llevar a buen puerto los objetivos primordiales de una gerencia de mantenimiento de calidad, que son: tener activos que operen la mayor cantidad del tiempo, con interrupciones aceptables, con pequeños tiempos de reparación, con máxima seguridad, bajo desperdicio y mínimo costo.



# fractal

## Gestión de Mantenimiento 4.0 para un Mundo Conectado



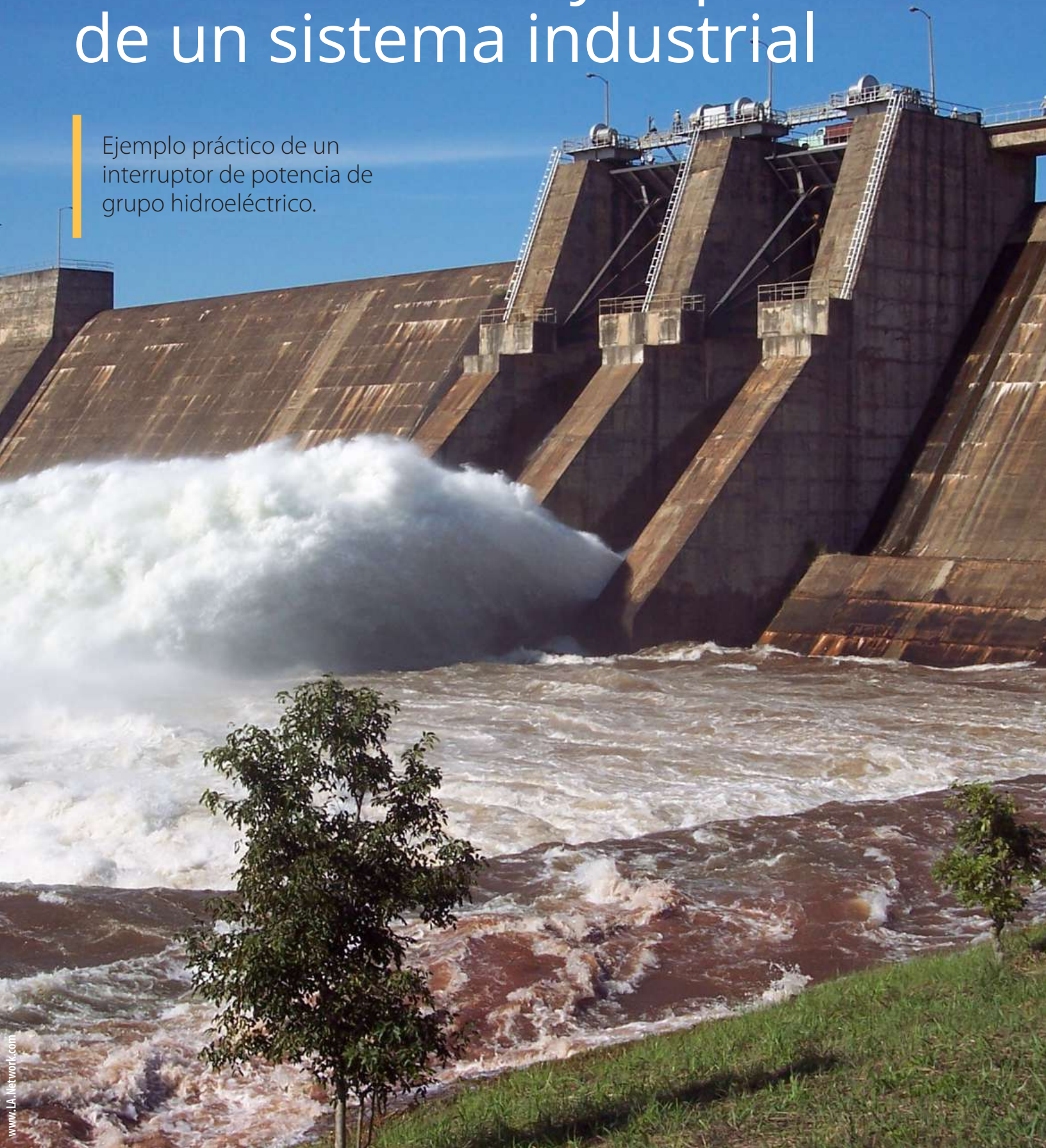
Pide tu demo gratis en [www.fractal.com/predictiva21](http://www.fractal.com/predictiva21)

Nuestros clientes nos reconocen:



# Análisis de mejoras en el mantenimiento y explotación de un sistema industrial

Ejemplo práctico de un interruptor de potencia de grupo hidroeléctrico.



**Francisco Javier Martínez Monseco.**

Responsable técnico de las centrales hidroeléctricas de Enel Green Power Hydro en la Agrupación Ter (Barcelona, Girona.España).  
 Doctorando en el programa de tecnologías industriales. ETSI UNED.  
 jmartinezm@ebcn.cat

## Resumen

**P**ara el responsable de una instalación industrial existe el momento en que, debido a los problemas que se presentan en el funcionamiento normal de dicho sistema, debe de comenzar a analizar la posibilidad de realizar un estudio del estado actual para identificar las acciones que garanticen que el funcionamiento de dicho sistema se desarrolle con parámetros de fiabilidad más elevados y, que a la vez, se pueda ganar en eficiencia en el funcionamiento del propio sistema, teniendo en cuenta un ahorro en el mantenimiento futuro a desarrollar, así como un ahorro energético y económico en la manera de funcionar después de la adecuación. Para poder analizar la mejor solución en la adecuación del sistema obsoleto, es muy útil poder aplicar un análisis centrado en la fiabilidad denominado RCM (reliability centered maintenance), donde se pueda valorar la problemática actual del sistema en su funcionamiento, su criticidad, así como las diferentes estrategias de mantenimiento y/o rediseños a implementar para modernizar el sistema. Se explica un caso de estudio aplicado a un interruptor de potencia de grupo hidroeléctrico, como elemento crítico en el funcionamiento y la seguridad de este sistema industrial.

**PALABRAS CLAVE.**

Fiabilidad, RCM, Mantenimiento preventivo, Análisis de modos de fallo del Sistema, central hidroeléctrica en caverna, Reliability.

### 1. Objetivos y beneficios del mantenimiento centrado en la fiabilidad

La metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es la mezcla óptima de las prácticas de mantenimiento reactivo, tiempo o basado en el intervalo, basado en la condición y proactivo. Estas estrategias de mantenimiento principal, en lugar de ser aplicadas de manera independiente, se integran para aprovechar sus respectivas fortalezas para maximizar la fiabilidad de instalaciones y equipos y minimizando los costos de ciclo de vida.

### Los objetivos de un programa eficaz de mantenimiento preventivo son los siguientes:

- Mantener la función de un elemento en los niveles de confiabilidad requeridos en el contexto operativo.
- Obtener la información necesaria para la mejora del diseño cuya fiabilidad resulte inadecuada.
- Cumplir con estos objetivos con el mínimo coste total del ciclo de vida.
- Obtener la información necesaria para el programa continuo de mantenimiento que mejore el programa inicial.

El RCM mejora la eficacia del mantenimiento y proporciona un mecanismo para gestionar el mantenimiento con un alto grado de control y conocimiento. Los beneficios del RCM se pueden resumir en los siguientes:

- La confiabilidad del sistema puede incrementarse mediante la ejecución de actividades de mantenimiento.
- Los costes globales se pueden reducir mediante un esfuerzo en mantenimiento planificado más eficiente.
- Los gestores del mantenimiento disponen de una herramienta de gestión que acrecienta el control y la dirección.

### 2. Metodología del mantenimiento centrado en fiabilidad

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, 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. 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.

### Las etapas básicas de un programa RCM son las siguientes:

- Inicio y planificación.
- Análisis de fallos funcionales.
- Selección de tareas.
- Implementación y Mejora continua.

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.

Dentro del mundo del Mantenimiento industrial, las preguntas que se hace un responsable técnico de mantenimiento en la realización de su trabajo suelen ser:

-¿Realmente estoy haciendo el mantenimiento correcto al equipo que mantengo?

-¿Podría realizar algo más para aportar mayor fiabilidad al sistema mantenido?

-¿De qué forma podría mejorar el plan de mantenimiento del sistema analizado?

Muchas veces el mantenimiento a realizar de cualquier sistema industrial se realiza en base al "libro de mantenimiento" que hay en cada industria y que es intocable desde "siempre", pero la experiencia del mantenimiento diario nos tiene que servir para tener la información necesaria a aportar en la mejora y modificación del propio mantenimiento del sistema. La sociedad actual requiere que cada vez más existan procesos industriales en los que se debe garantizar la máxima disponibilidad de los sistemas, y a la vez exista el mínimo número de incidencias que eviten la indisponibilidad del proceso. En los últimos 20 años, las estrategias de mantenimiento se han basado en asegurar que los procesos continúen haciendo lo que los usuarios quieren que hagan y en el momento que lo quieren hacer.

El objetivo principal de RCM es definir una política de mantenimiento de equipo componente basada en varios criterios, incluyendo falta, coste, fiabilidad y seguridad. RCM es realmente una guía para los gerentes de mantenimiento en la toma de decisiones sobre mantenimiento basado en el planeamiento desarrollado durante el análisis RCM. A pesar de ser la herramienta de gestión de mantenimiento, RCM debe actualizarse con la nueva información según sea necesario.

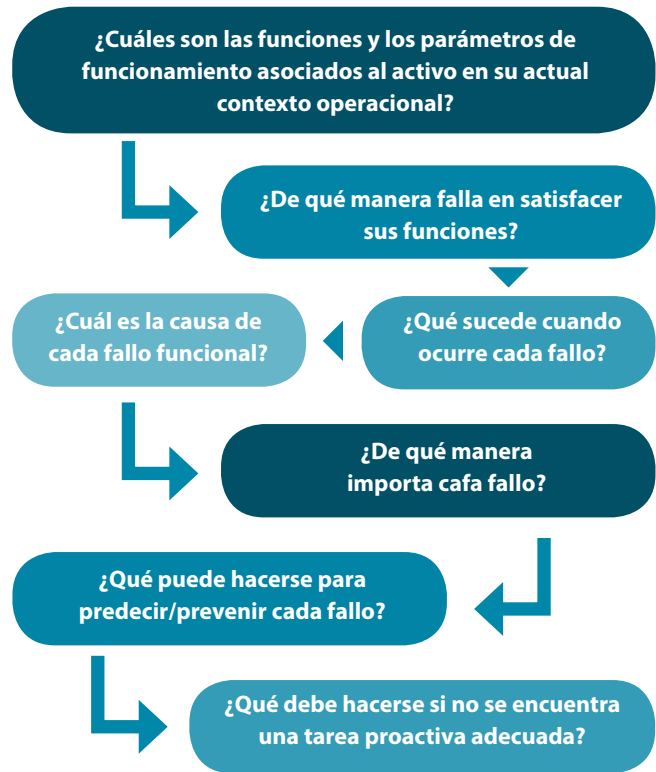
RCM fue desarrollado primero por la aeronáutica durante la década de 1960. A mediados del siglo XX las nuevas tecnologías en las plantas de energía nuclear, aviones, submarinos nucleares, dispositivos aeroespaciales condujeron a la necesidad de desarrollar herramientas que permitan el uso seguro de estas tecnologías. En particular

de la línea aérea industrial creció hacia fuera de un enfoque sistemático para el desarrollo de mantenimiento conocido como mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

Mediante el análisis RCM podemos definir el estado actual del sistema industrial, realizar el análisis del funcionamiento del sistema en cuanto a fiabilidad y definir los fallos que se han producido (análisis histórico), así como las posibles acciones de mejora en el funcionamiento y en el mantenimiento. Este análisis nos llevará a una serie de acciones a planificar que pueden incluso basarse en un rediseño que mejore aspectos importantes de la instalación como son la seguridad y el medioambiente.

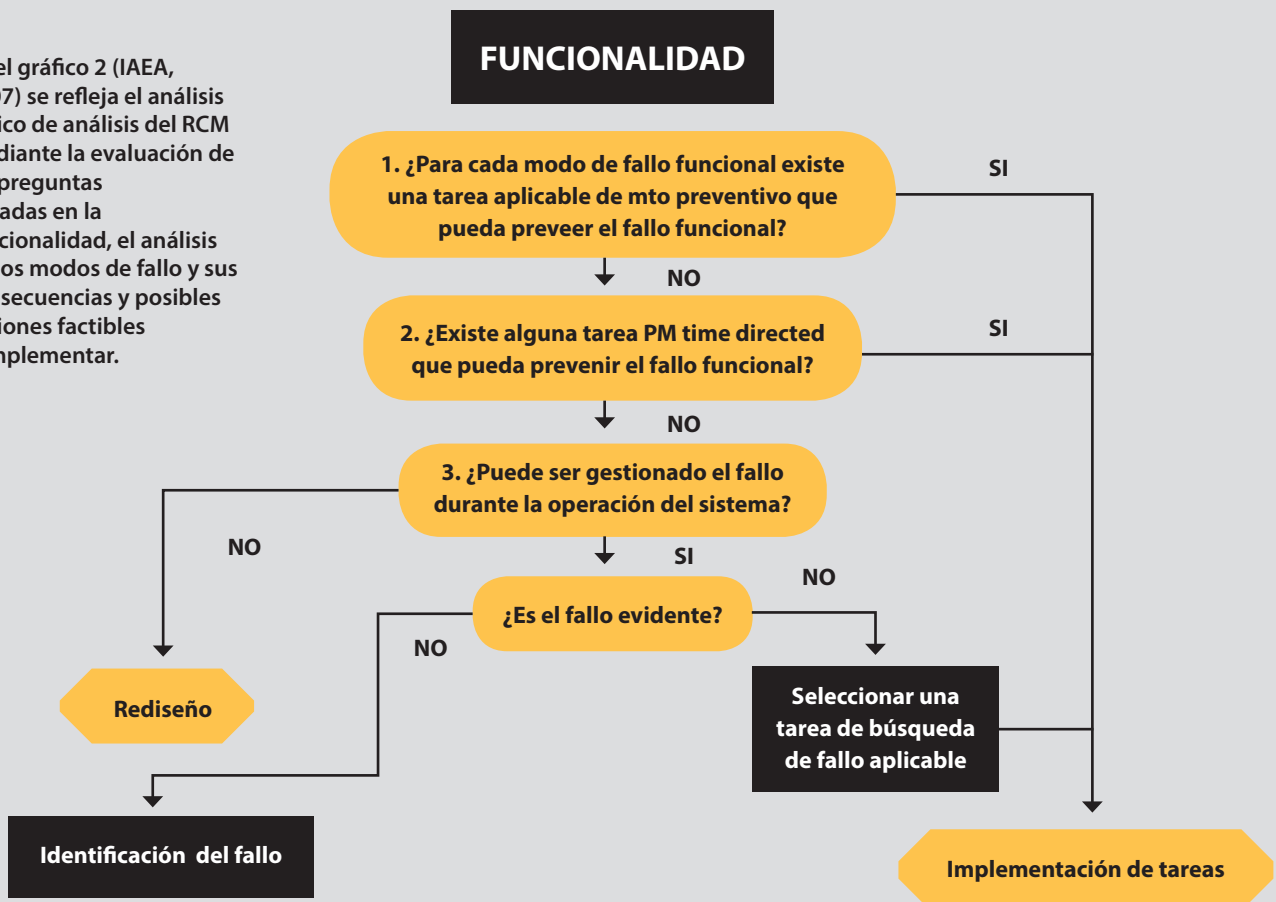
## 2.1 RCM: Las siete preguntas básicas

Para el desarrollo del proceso RCM, es necesario realizar siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta analizar. En la gráfica 1 se adjuntan (Moubray, 1997). Estas 7 cuestiones, constituyen la base de análisis que nos tenemos que plantear para cada activo físico, de cara a conocerlo y definir realmente cuál es la función que le exigimos, cómo puede fallar y qué debemos realizar para minimizar dichos fallos.

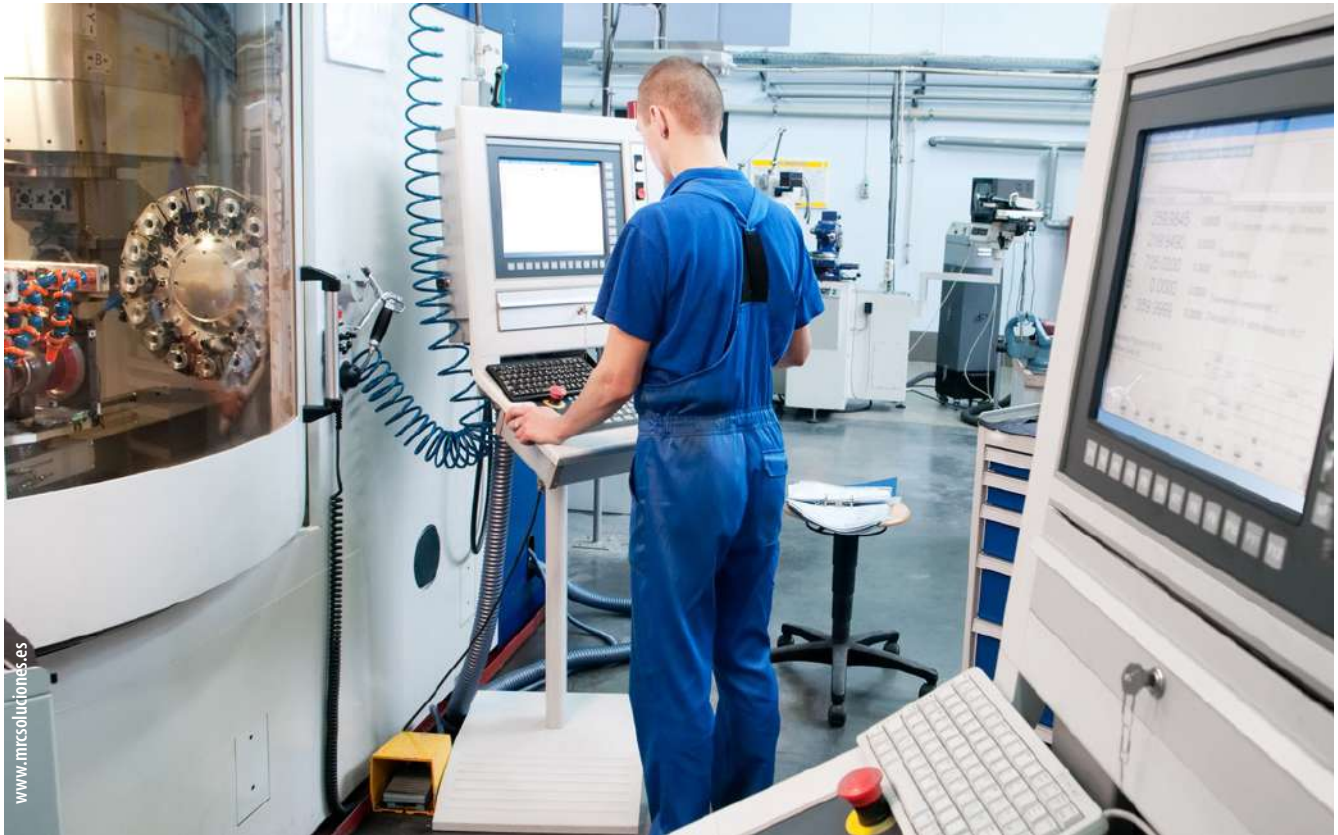


Gráfica 1. 7 preguntas básicas del proceso RCM (Moubray, 1997).

En el gráfico 2 (IAEA, 2007) se refleja el análisis lógico de análisis del RCM mediante la evaluación de las preguntas basadas en la funcionalidad, el análisis de los modos de fallo y sus consecuencias y posibles acciones factibles a implementar.



Gráfica 2. Analisis arbol lógico RCM (IAEA, 2007).



## 2.2 Consecuencias del fallo

Un punto fuerte de RCM es que reconoce que las consecuencias de los fallos son más importantes que sus aspectos técnicos.

El proceso de RCM clasifica estas consecuencias en cuatro grupos, de la siguiente manera:

- Consecuencias de fallos ocultos: los fallos ocultos no tienen un impacto directo, pero exponen a la organización a fallos múltiples con consecuencias serias y hasta catastróficas.
- Consecuencias ambientales y para la seguridad: un fallo tiene consecuencias para la seguridad si es posible que cause daño o la muerte a alguna persona. Tiene consecuencias ambientales si infringe alguna normativa o reglamento ambiental tanto corporativo como regional, nacional o internacional.
- Consecuencias operacionales: un fallo tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (cantidad, calidad del producto, atención al cliente, o costos operacionales) además del costo directo de la reparación.
- Consecuencias no-operacionales: los fallos que caen en esta categoría no afectan a la seguridad ni la producción, sólo se relacionan con el costo directo de la reparación

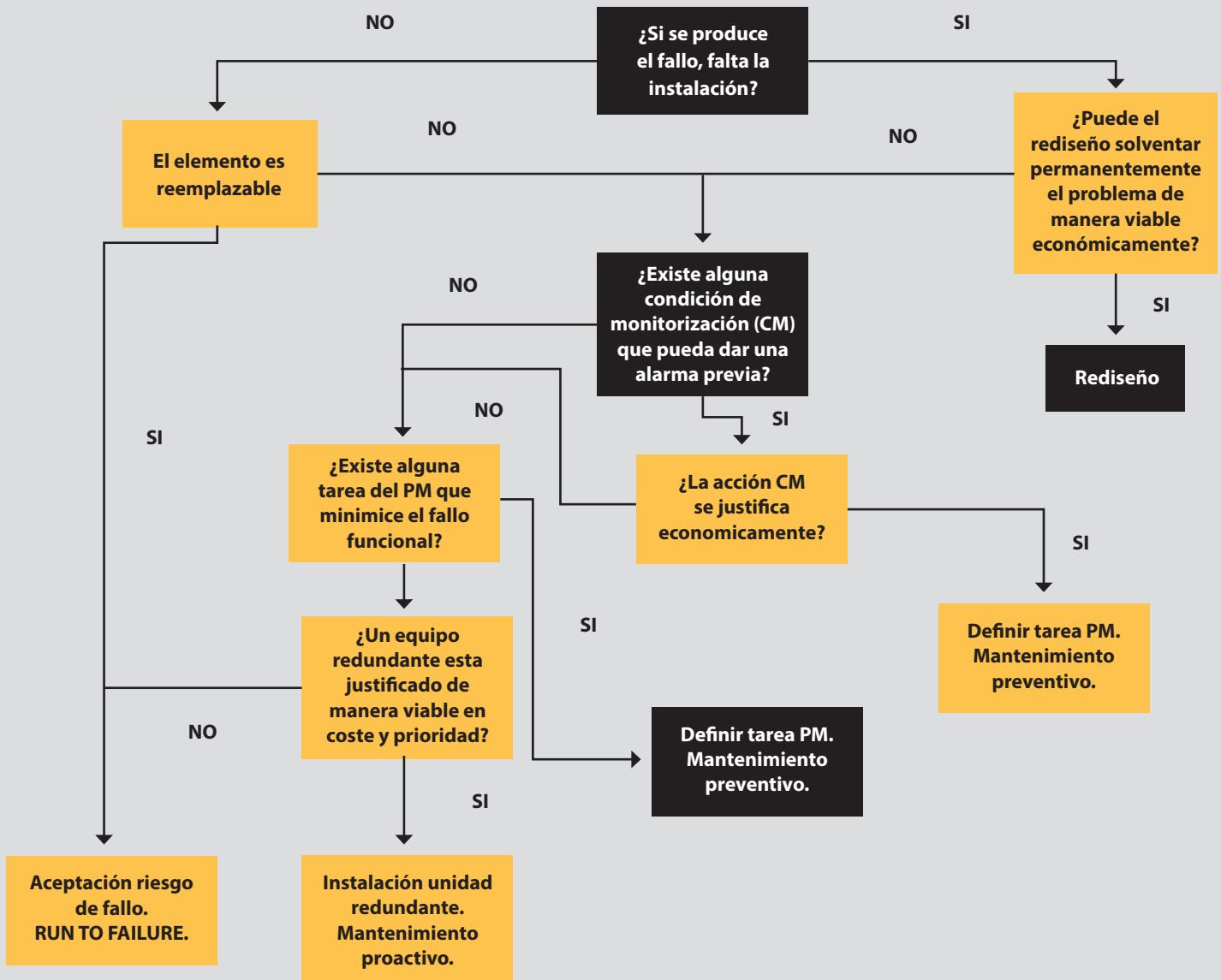
“ El objetivo del RCM contempla falta, coste, fiabilidad y seguridad ”

Al establecer una revisión obligada de las consecuencias de cada modo de fallo con relación a las categorías recién mencionadas, integra a los objetivos operacionales, ambientales, y de seguridad de la función del mantenimiento. Esto contribuye a incorporar a la seguridad y al medio ambiente en la corriente principal de gestión del mantenimiento.

Las técnicas de manejo de fallos se dividen en dos categorías:

- Tareas proactivas: estas tareas se emprenden antes de que ocurra un fallo, para prevenir que el ítem llegue al estado de fallo. Abarcan lo que se conoce tradicionalmente como mantenimiento “predictivo” o “preventivo”, aunque veremos luego que RCM utiliza los términos reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, y mantenimiento a condición.
- Acciones a falta de: estas tratan directamente con el estado de fallo, y son elegidas cuando no es posible





**Grafi3.** Arbol lógico RCM. (Chalifoux,1999).

identificar una tarea proactiva efectiva. Las acciones "a falta de" incluyen búsqueda de fallo, rediseñar, y mantenimiento a rotura (correctivo).

En la gráfica 3 (Chalifoux, 1999), se representa el análisis lógico de preguntas a realizarse en el análisis RCM de cara a poder analizar la acción más adecuada a ejecutar.

### 2.3 Introducción: Análisis de modo y efectos de fallos.

Análisis de modo y efectos de falla (FMEA, failure mode and effects analysis) es un enfoque cualitativo propuesto aclarar modos de falla de equipos en equipos de análisis o desarrollo de productos para apoyar las

decisiones cuando hay falta de información y datos para llevar a cabo análisis cuantitativo. FMEA puede aplicarse también a los equipos operacionales para apoyar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) análisis, análisis de riesgo, confiabilidad centrada en el mantenimiento (RCM) y la política de mantenimiento. La estrategia de análisis de fallos y efectos también se puede utilizar para evaluar cada pieza del equipo y su modo de falla. Dicho análisis puede centrarse en seguridad, medio ambiente o efectos operativos, en caso de fallos de equipos.

### 2.4 Análisis de criticidad para definir la lista de equipos críticos.

En muchos casos, es necesario priorizar el equipo más crítico en una planta industrial para evitar fallos críticos y definir un programa de mantenimiento. Por lo tanto, el objetivo principal del análisis de criticidad es definir el equipo crítico basado en las peores consecuencias de la falta con respecto a aspectos como seguridad, ambiente, producción y costos. En base a esto, el sistema de clasificación que se presenta en la tabla 1 (Sifonte, 2017), que oscila entre 1 y 4, evalúa y puntuaciones de cada aspecto.



**Fotografía 1.** Izado estator de grupo hidroeléctrico. Ejemplo de equipo crítico que requiere planificación en las acciones de mantenimiento a ejecutar (Fuente: Enel Green Power-Endesa Generación).

**Tabla 1.** Matriz de análisis criticidad de activos genéricos. (Sifonte, 2017).

## Matriz de análisis de criticidad de activos genéricos

VALOR	NIVEL DE AFECTACIÓN	SEGURIDAD	MEDIOAMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	FRECUENCIA
0	Sin impacto	Sin efecto	Sin polución	Sin parada	Sin coste	>5 años
1	Menor	Sin efecto seguridad y sin tratamiento	Polución menor	Parada menor	Coste mantenimiento menor	1<x<5 años
2	Moderado	Efectos limitados en la seguridad	Alguna polución	Parada dentro de límite	Coste mantenimiento aceptable	1 mes<x<1 año
3	Severo	Daños serios, pérdida de potencial de la función de seguridad	Polución significativa	Parada dentro de límites aceptables	Coste por encima del normal	1 semana<x<1 mes
4	Catastrófico	Pérdida de vidas. Sistemas críticos no operativos	Polución mayor	Parada producción	Coste mantenimiento alto	x<1 semana

## 2.5 Patrones de fallo.

Uno de los puntos más importantes del análisis RCM es poder definir, para cada componente que interviene en el activo físico (sistema industrial), el patrón de fallo a considerar. Esta característica del componente es muy importante ya que nos permitirá definir el periodo de tiempo donde consideramos que el componente puede desarrollar su función sin fallo y, a la vez, nos permite controlar dicho periodo para planificar la acción que vayamos a definir una vez realizado el análisis RCM. Desde mitad del siglo XX se han realizado múltiples estudios en este campo, principalmente en sistemas industriales que requieren un nivel de fiabilidad muy alto de cara a evitar consecuencias catastróficas por la producción de fallos. United Airlines realizó a partir de 1950 un trabajo pionero en este campo al establecer el marco

general y directrices específicas para la realización de este tipo de estudio. Estudió la relación entre la tasa de fracaso (probabilidad de falla condicional) y tiempos de operación de la aeronave. Una primera conclusión que surgió de ese trabajo fue la caracterización de los patrones de fallos de los distintos componentes de las aeronaves. En las décadas de los 60's y 70's produjeron un cambio fundamental en la importancia de los tipos de las tasas de fracaso. Se muestra en la tabla 2 los diferentes patrones analizados, así como las características de los Componentes Asociados. En la tabla 3 se indican los diferentes % de cada patrón de fallo que se estudiaron en varios estudios desarrollados, así como las características de cada patrón de fallos. Estas dos tablas nos permiten tener una idea sobre cómo se desarrolla la vida útil de los componentes y su aplicabilidad al sistema industrial que queramos analizar.

**Tabla 2.** División en porcentajes de diferentes estudios relacionados con los patrones de fallos en los componentes industriales. (Smith, 2003).

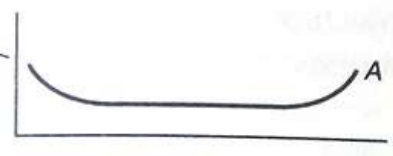
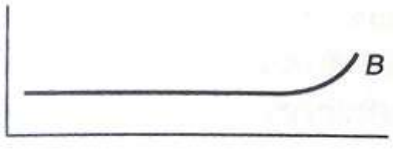

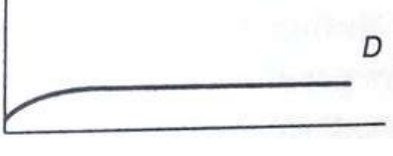
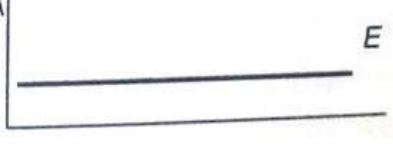
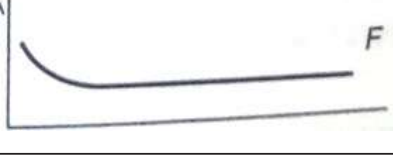
### Estudios de análisis de patrones de fallos para componentes

PATRÓN DE FALLO DE COMPONENTE	UNITED AIRLINES REPORT (UAL, 1978)	BROBERG REPORT (1973)	MSDP REPORT. AIRCRAFT DATA (1982)	SSMD REPORT. NAVY DATA (1993)	SUBMEPP REPORT. NAVY DATA (2001)
A	4%	3%	3%	6%	2%
B	2%	1%	17%		10%
C	5%	4%	3%		17%
D	7%	11%	6%		9%
E	14%	15%	42%	60%	56%
F	68%	66%	29%	33%	6%



Tabla 3. Clasificación de los patrones de fallos y características. (Smith, 2003).

## Clasificación de patrones de fallos Características y ejemplos de componentes

Patrón de fallos				
A	4%	11% de patrones de fallos es beneficioso implantar un límite de funcionamiento para realizar una acción.		Curva de bañera en 3 etapas. (mortalidad infantil, ratio constante, región de pérdida de fiabilidad)
B	2%			A partir de un momento dado se produce un incremento exponencial en la probabilidad de fallo.
C	5%			Incremento gradual de probabilidad de fallo. No es deseable imponer un límite de edad en estos casos.
D	7%	89% de patrones de fallo de componentes no aporta nada imponer un límite de funcionamiento para la realización de una acción.		Baja probabilidad de fallo.
E	14%			Probabilidad constante de fallo.
F	68%			Mortalidad infantil. Probabilidad constante.

### 2.6 Estrategia de Mantenimiento.

A continuación, y como conclusión de lo explicado, se analiza un caso práctico de estudio con un equipo crítico dentro de un sistema industrial de alta fiabilidad como es el caso de un grupo hidroeléctrico: el interruptor de potencia.

#### 2.6.1 Interruptor de potencia automático.

Se define un interruptor automático como un aparato destinado a la apertura y cierre de un circuito y que tiene la capacidad de establecer, soportar e interrumpir tanto la corriente nominal, como en estado de sobrecarga y en estado de defecto en cortocircuito. Las características de

rapidez de corte para eliminar la corriente de defecto cuanto antes y de robustez para soportar las solicitaciones del cortocircuito aún en estado de ruptura, hacen que el interruptor automático no sea adecuado para gran número de maniobras. No obstante, como se verá después, la ejecución de los interruptores modernos permiten una cantidad y frecuencia de maniobras muy elevadas.

Cuando se usa el nombre específico de interruptor automático se quiere definir a un interruptor que siempre tiene la posibilidad de recibir una orden de apertura desde unos relés de protección o a voluntad de un operador a distancia, que le hacen abrir en caso de avería,

desconectando el circuito que ha sufrido el defecto. El interruptor automático es un aparato totalmente automático no solamente en cuanto a su posibilidad de apertura y cierre, sino con carga de muelles motorizada, bobinas de cierre, disparo a distancia y gran cantidad de accesorios para su propia supervisión.

La característica fundamental que diferencia al interruptor de otros aparatos que veremos después, es su capacidad para cortar las grandes intensidades de un cortocircuito, por lo que se suele decir que el interruptor es un aparato con capacidad de corte o capacidad de ruptura del arco aún a grandes corrientes.



**Fotografía 2.** Interruptor de potencia de grupo hidroeléctrico (Fuente: Enel Green Power-Endesa Generación).

Tensión nominal $U_n$	145 kV
Tensión soportada a impulso tipo rayo $U_p$	650 kV
Tensión soportada a frecuencia industrial $U_d$	275 kV
Frecuencia nominal $f_n$	50 Hz
Corriente nominal (de servicio) $I_n$	2000 A
Corriente nominal de corte en cortocircuito $I_{cc}$	31.5 kA
Duración nominal del cortocircuito $t_{cc}$	3 s
Corriente nom. de corte en condiciones de asincronismo $I_{ca}$	7.9 kA
Factor de primer polo	1.5
Corriente de corte nominal en línea aérea $I_l$	50 A
Corriente de corte nominal en cables $I_c$	160 A
Secuencia nominal de maniobra	0-0,3s-C0-1min-C0
Presión del SF <sub>6</sub> a +20° C	6.0 bar
Peso de la carga de SF <sub>6</sub>	9.8 kg
Peso con la carga de SF <sub>6</sub>	1580 kg
Valores nominales de alimentación de los circuitos auxiliares:	
Tensión de mando	DC 125 V
Tensión de accionamiento	DC 125 V
Tensión de calefacción	AC 220 V
Clase de temperatura	-25...+40 °C

**Fotografía 3.** Características técnicas de placa de un interruptor de potencia de grupo hidroeléctrico. (Fuente: Enel Green Power-Endesa Generación).

Aplicando lo explicado en el artículo, lo primero que deberemos analizar del interruptor de potencia son los diferentes parámetros recogidos en la tabla Amfec (funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos, acciones de mantenimiento), así como el análisis de la criticidad de cada uno de los modos de falla analizados de

para considerar las averías más críticas si se producen en base a los cuatro aspectos a analizar en la asignación de recursos de mantenimiento en cualquier sistema industrial (tabla 1, Matriz de análisis de criticidad) en cuanto a: Seguridad, Medioambiente, Producción y Mantenimiento.

**Tabla 4** Amfec de análisis RCM de un interruptor de potencia de grupo hidroeléctrico.

FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE LA FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CRITICIDAD. TOTAL 16	TIPOLOGIA DEL MANT.	SOLUCIÓN ANTE INCIDENCIA	FREC.
Cerrar circuito trifásico XXX kV./X000 A. en un tiempo < a 0,00X s. En discordancia de fases, un tiempo de cierre < 0,0XX s. Y con una resistencia de paso < a XX microohms.	No cierra	No llega la orden de cierre por fallo en circuito de mando. Por borna floja por vibraciones	El cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	9	Revisión	Revisar circuito. Dos personas 2 h.	3 años
		No hay presión suficiente de aire en la maniobra por rotura manguitos flexibles por vibraciones.		9	Revisión	Revisar circuito de aire, sustitución de manguitos. Dos personas 4 h.	3 años
		No hay presión suficiente de aire en la maniobra por falta de estanqueidad en las juntas del embolo deteriorada por envejecimiento.		9	Revisión	Sustitución de juntas del embolo. Dos personas 2 días.	3 años
		Bloqueo interruptor por fuga de hexafluro por junta envejecida.	Una fuga excesiva de SF6 provoca el bloqueo del interruptor para evitar la destrucción de este, el cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	12	Revisión	Revisar circuito SF6 y reposición de gas. Dos personas 6 días.	3 años
		Bloqueo de conexión del aire comprimido por anomalía electro válvula X por agarrotamiento mecánico debido a envejecimiento.	La falta de aire de maniobra del interruptor provoca el bloqueo de la maniobra de cierre, el cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	10	Revisión	Desmontaje y sustitución de la electro válvula. Dos personas 6 h.	3 años
		Anomalía válvula reductora X por desajuste de la presión de funcionamiento aire (Xkg) por envejecimiento.	Actúa la protección de discordancia de polos, el cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	10	Revisión	Desmontaje y sustitución válvula reductora. Dos personas 8 h.	3 años
		Discordancia de polos por desajuste mecánico polo.	Actúa la protección de discordancia de polos, el cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	10	Revisión	Revisar polo. Dos personas 5 días.	3 años
		Discordancia de polos por avería relé temporizado de simultaneidad de los polos.		10	Revisión	Desmontaje relé y sustitución relé. Dos personas 2 h.	3 años
		Discordancia de polos por anomalía micro contactos posición de polos.		10	Revisión	Desmontaje y sustitución de micro contactos. Dos personas 8 h.	3 años
		Bloqueo de función por aire comprimido por anomalía presostato F por envejecimiento	La falta de aire de maniobra del interruptor provoca el bloqueo de la maniobra de cierre, el cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	9	Revisión	Desmontaje y sustitución presostato. Dos personas 4 h.	3 años
Anomalía válvula manual de emergencia X por fugas cierre de la válvula.	La falta de aire de maniobra del interruptor provoca el bloqueo de la maniobra de cierre, el cierre de este interruptor no afecta a la operatividad de la operación. No interviene en la secuencia de arranque, pero su no cierre provocaría indisponibilidad de grupo.	9	Revisión	Desmontaje y sustitución de la válvula. Dos personas 8 h.	3 años		

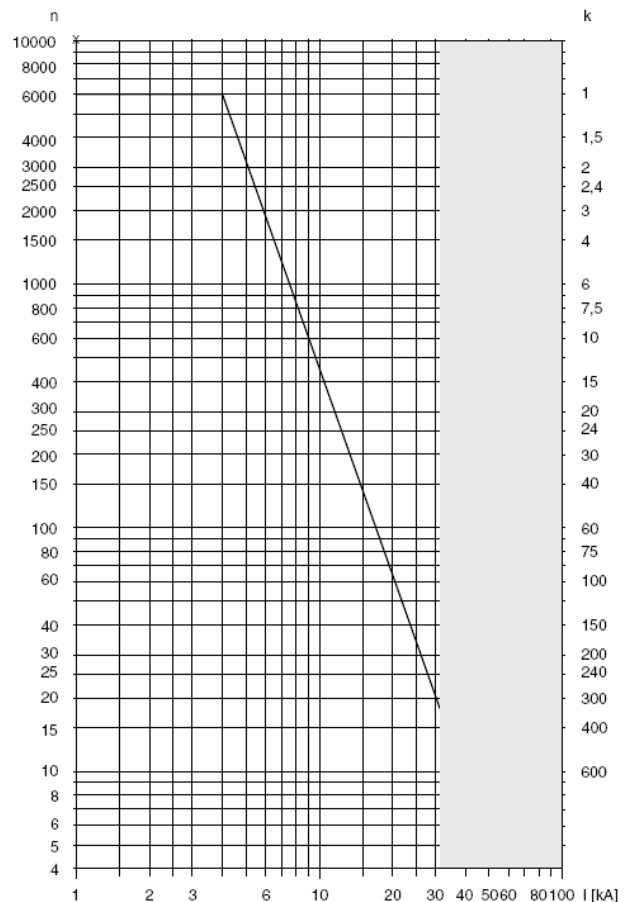
FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE LA FALLA	EFECTO DE LA FALLA	CRITICIDAD. TOTAL 16	TIPOLOGIA DEL MANT.	SOLUCIÓN ANTE INCIDENCIA	FREC.
Cerrar circuito trifásico XXX kV./X000 A. en un tiempo < a 0,00X s. En discordancia de fases, un tiempo de cierre < 0,0XX s. Y con una resistencia de paso < a XX microohms.	Cierra con un tiempo de discordancia de polos > 0,00X s.	Desajuste mecánico en bielas transmisión por desgaste	El tiempo de sincronismo es superior a 0,00X s. por lo que actúa la protección de desequilibrio de carga.	10	Revisión	Tiempo de ajuste 3 días a efectuar por personal especializado de contrata	3 años
	Cierra con un tiempo > 0,0XX s.	Fallo en el mecanismo de transmisión de cierre por desgaste.	Envejecimiento de las cámaras de corte del interruptor,	12	Revisión	Solamente detectable mediante pruebas de medida electrónica de tiempo, resistencias e intensidades.	3 años
	Cierra con una resistencia de paso >XX microohms.	Desgaste excesivo de la piña (contacto fijo)	Penetración incorrecta, aumento de la temperatura en la cámara de corte, y aumento rápido de la degradación de ésta. Se detecta por la medición de la resistencia con intensidad no inferior a 300 A.	12	Revisión	Solamente detectable mediante pruebas de medida electrónica de tiempo, resistencias e intensidades.	3 años
		Desgaste excesivo de la vela (contacto móvil)	Penetración incorrecta, aumento de la temperatura en la cámara de corte, y aumento rápido de la degradación de ésta.	12	Revisión	Se detecta por la medición de la resistencia con intensidad no inferior a X00 A.	3 años
Abrir circuito trifásico XXX kV./X000 A. De In y con un poder de corte de X0 KA., unión del transformador con red exterior, en un tiempo<0,0X0 seg.	No abre	Bloqueo SF6 por protección de presión baja por fugas de gas del circuito por juntas envejecidas	Si actúa el bloqueo por SF6, el Interruptor no podrá operarse, por lo cual se deberá aislar el Interruptor de las fuentes de alimentación de posibles entradas y salidas de tensión.	12	Revisión	Solicitud de descargo urgente para la revisión del circuito de gas y reparación. 3 Operarios 5 días.	3 años
	Poder de corte > XX kA	Fallo en manodensostato por desajuste indicando presión normal.	Posible destrucción del polo afectado del interruptor al realizar la apertura. Grupo indisponible. Verificar con manodensostato patrón la indicación del interruptor.	14	Revisión	Tiempo de reparación 1 semana a efectuar por personal cualificado de contrata.	3 años
	Tiempo de apertura > 0,0XX seg.	Apertura lenta por desajuste piston por envejecimiento	Posible destrucción del interruptor ente la apertura con una intensidad próxima a los XX kA	14	Revisión Revisión	Seguimiento información revisiones	3 años
Calefactar el armario de maniobra cuando la temperatura sea <XX°C.	No calefacta	Resistencia averiada por envejecimiento	La falta de calefacción en el armario produce humedades que provocan envejecimiento prematuro de los elementos de mando y maniobra.	4	Inspección	Sustitución de la resistencia calefactora. 1 Operario, 2 h.	1 año
		Termostato averiado por envejecimiento		4	Inspección	Sustitución del termostato 1 Operario, 2 h.	1 año
Dar alarma nivel bajo de hexafloruro en remoto.	No da alarma	Fallo manodensostato	La alarma de nivel bajo SF6 no señalaría .	4	Inspección	Reparación de fuga, sustitución manodensostato y reposición nivel SF6. 2 días por personal especializado.	1 año
		Borna floja por vibraciones.		4	Inspección	Reparación de fuga, revisión cableado manodensostato y señalización, reposición nivel SF6. 2 días por personal especializado.	1 año
	Da alarma cuando el nivel de SF6 es correcto	Fallo manodensostato.	La alarma de nivel bajo se activaría sin tener nivel bajo por fallo manodensostato.	4	Inspección	Revisar el interruptor y sustituir manodensostato. 2 días por personal especializado.	1 año

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE LA FALLA	EFEECTO DE LA FALLA	CRITICIDAD. TOTAL 16	TIPOLOGIA DEL MANT.	SOLUCIÓN ANTE INCIDENCIA	FREC.
Disparar el Interruptor por baja presión SF6	No dispara dispara cuando el nivel de SF6 es correcto	Fallo manodensostato	El disparo de nivel bajo SF6 no señalaría y no abre el interruptor desencadenando un fallo múltiple.	8	Inspeccion	Reparación de fuga, sustitución manodensostato y reposición nivel SF6. 2 días por personal especializado.	1 año
		Borna floja por vibraciones.		4	Inspeccion	Reparación de fuga, revisión cableado manodensostato y señalización, reposición nivel SF6. 2 días por personal especializado.	1 año
	Dispara cuando el nivel de SF6 es correcto	Fallo manodensostato.	El disparo de nivel bajo se activaría sin tener nivel bajo por fallo manodensostato.	4	Inspeccion	Revisar el interruptor y sustituir manodensostato. 2 días por personal especializado.	1 año
Bloquear interruptor por baja presión SF6.	No bloquea.	Fallo manodensostato	El bloqueo de nivel bajo SF6 no señalaría y no bloquearía el grupo desencadenando un fallo múltiple.	4	Inspeccion	Reparación de fuga, sustitución manodensostato y reposición nivel SF6. 2 días por personal especializado.	1 año
	Bloquea el interruptor cuando la presión es normal.	Fallo manodensostato.	El bloqueo de nivel bajo se activaría sin tener nivel bajo por fallo manodensostato.	4	Inspeccion	Revisar el interruptor y sustituir manodensostato. 2 días por personal especializado.	1 año

## Conclusión

Del análisis Amfec descrito, se observa claramente que el parámetro a controlar del equipo analizado es la intensidad de corte que se produce en cada apertura de interruptor, ya que su degradación como equipo eléctrico vendrá relacionada con las maniobras producidas de apertura así como la intensidad que ha tenido que cortar. Este parámetro es muy difícil de analizar en la vida útil de un interruptor, por lo que deberemos ir realizando un seguimiento en dos periodos definidos para que vayamos analizando esta degradación del equipo. Estos periodos podrían ser:

**INSPECCIÓN INTERRUPTOR.** Cada 1 año.  
**REVISIÓN INTERRUPTOR.** Cada 3 años.



**Gráfica 4.** Número de maniobras de un interruptor en función de la intensidad de corte a despejar ( k A).





E&M Solutions International, S.A.

EMS te brinda lo que quieres para  
tu empresa en mantenimiento  
y gestión de activos.

## Y ahora canaliza tus necesidades desde Panamá

En nuestras nuevas oficinas recreamos y desarrollamos los planes de mantenimiento para toda centroamérica y el Caribe. Con el respaldo de una larga experiencia y el empuje de sus profesionales, EMS se consolida como la opción perfecta para el cuidado de tus activos físicos.

EMS soluciones especializadas de Ingeniería y Gestión de Activos, ahora en Panamá.

Ubicados en: Torre de Las Américas, Torre B, Piso 15, Punta Pacífica, Panamá.

Foto:  
©Hanami Sohn

Contáctanos:

E&M Solutions 

@eym\_solutions 

www.eymsolutions.com 

corporatepanama@eymsolution.com 

# APRENDER DE OTRAS EMPRESAS:

## Las aerolíneas de bajo costo y la industria minera

**Ejemplo.** La innovación está presente en todos los procesos industriales. Un análisis entre dos sectores resulta positivo para la reducción de costos en una empresa minera.



**Víctor Barrientos Boccardo**

Mg (E) PUCV, Mg UTFSM, Ingeniero Civil Mecánico UCH  
 Cap Minería  
*Jefe Mantenimiento Mina CNN*  
 Chile  
 victorbarrientos75@hotmail.com

Uno de los métodos para la búsqueda de ideas de innovación en los procesos productivos como la minería, es observar otros sectores industriales, entender sus formas de operar y ver cómo estas pueden ser aplicadas en nuestros procesos. Siguiendo este procedimiento, se realizó un análisis de la operación de las aerolíneas de bajo costo.

En los últimos veinte años, el mercado aeronáutico ha cambiado considerablemente introduciéndose en el concepto de líneas aéreas “low costs”, las cuales tienen por objetivo ofrecer pasajes aéreos al más bajo costo posible. Este concepto se ha masificado por todo el mundo y algunas empresas como Virgin Blue (Australia), Ryanair (Europa) y Southwest (EE.UU) son ampliamente reconocidas en sus respectivos continentes por trabajar bajo este concepto. De igual forma que en el sector minero, en el transporte aéreo de pasajeros, los gastos en mantenimiento, revisiones y reparaciones representan una cifra considerable y, según la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA), alcanzan unos 10.600 millones de dólares anuales.

En el transporte aéreo de pasajeros, los gastos en mantenimiento, revisiones y reparaciones representan una cifra considerable y, según la Asociación, Internacional de Transporte Aéreo (IATA), alcanzan unos

**10.600**  
**MILLONES**  
 de dólares anuales





Las empresas mineras pueden tomar como referencia el modelo de negocios de las aerolíneas de bajo costo y evaluar la factibilidad técnica y económica de aplicar algunas de

sus formas de operar. En la tabla siguiente se muestran los puntos más relevantes de su modelo y cómo estas pueden ser aplicadas en las operaciones mineras.

**Tabla 1.** Formas de operar y su posible aplicación en minería.

## Formas de operar y su posible aplicación en minería

No.	Aerolíneas de bajo costo	Potenciales prácticas aplicables en minería
1	Compra de aviones más eficientes en el consumo de combustible.	En el proceso de compra y renovación de equipos, incorporar la variable consumo de combustible.
2	Adquisición de aviones más caros por ser más productivos.	En la evaluación de proyectos de compra y renovación, agregar el factor de "costos totales". Los costos totales incluyen las pérdidas para la empresa por la falta de disponibilidad del equipo. Por ejemplo, camiones autónomos (sin operador) son más caros que los tradicionales, pero tienen en general mayores disponibilidades.
3	Uso de aviones a velocidades que minimicen su consumo de combustible.	Determinar las velocidades de operación en la que los camiones mineros disminuyen su consumo de combustible.
4	Vuelos cortos y frecuentes.	Minimizar las distancias de transporte.
5	Uso de aviones a velocidades que minimicen su consumo de combustible.	Maximizar la capacidad de carga del camión y el factor de llenado del balde de la pala, cumpliendo los rangos permisibles establecidos por el fabricante.
6	Estrategia de reemplazo de equipos para conservar las más altas disponibilidades, lo que trae consigo menores edades de las flotas de aviones.	Establecer un método para el monitoreo constante de los costos totales, y establecer el momento óptimo para el reemplazo del activo. Por ejemplo, vender el equipo antes que se realice su reparación mayor que trae consigo altos costos y tiempos extendidos de detención. Empresas como EasyJet y Ryanair tiene edades promedio de sus flotas de 6,4 y 6,6 años.

No.	Aerolíneas de bajo costo	Potenciales prácticas aplicables en minería
7	Uso de aeropuertos secundarios para la disminución de tiempos de embarque, desembarque, espera en el aire y rodaje previo al despegue.	Minimizar los tiempos por cambios de turno, tiempo de colas en chancador y tiempos de espera en las frentes de carguío (aumento de la utilización).
8	Utilizan un único modelo de avión para simplificar el entrenamiento de pilotos y personal de mantenimiento	Privilegiar que las flotas de equipo sean de una marca y modelo únicos. Por ejemplo, el uso de múltiples modelos hace aumentar la inversión requerida para los componentes de respaldo de alto valor, necesarios para soportar su funcionamiento.
9	Adquisición de aviones con asiento sin reclinación ni bolsillos (se evita el tiempo de mantenimiento en ellos)	Adquisición de equipos con accesorios que faciliten los trabajos de mantenimiento. Por ejemplo, flotas de camiones mineros que incluyan la transmisión inalámbrica de datos, para evitar las detenciones de los equipos para la descarga de información de sus computadores.
10	Uso de rutas aéreas sin conexiones de transbordo porque generan demoras que aumentan los costos.	Minimizar el doble carguío de material.
11	Uso de aviones de gran tamaño	Selección de equipos de mayores capacidades en cuanto a toneladas transportadas, velocidades de procesamiento, etc.
12	Minimizar la cantidad de empleados por avión	Uso de equipos de tecnología autónoma, o que requieran el mínimo personal para su conservación y operación. Al evitar las fallas provocadas por la operación minera, se generan menores requerimientos de servicios de mantenimiento y, por ende, menores dotaciones.
13	Uso de aeropuertos que ofrezcan menores costos de operación.	Definición de la secuencia de extracción de material que minimice los costos operacionales.
14	Observación de procesos de otros mercados.	Lo mismo Por ejemplo, algunas líneas aéreas han observado las prácticas de operación de las carreras de automóviles para incorporar algunas de ellas en sus procesos.

Como ejemplo, la línea aérea Virgin tiene una estrategia bien definida para el mantenimiento de los componentes de sus aviones y la gestión de los inventarios. Según estudio de la IATA, de los costos de mantenimiento directos, los componentes mayores o de alto valor representan un 23% (porcentajes similares se observan en minería), para los cuales se tiene un control y seguimiento específico. Las herramientas de análisis de datos que se traducen en funciones estadísticas de probabilidades de fallas, como las funciones Weibull, permiten tener una estimación



de la probabilidad que un componente tiene de fallar y, por consiguiente, estimar la disponibilidad del equipo. A medida que las aeronaves envejecen, la proporción de los gastos de mantenimiento se van concentrando hacia los motores, en desmedro de los gastos asociados a la estructura del equipo. Conclusiones similares han llegado algunos estudios de costos de mantenimiento para flotas de camiones mineros en Australia, que indican que los costos de reparación de los motores diesel es lo que define en mayor medida las decisiones de su reemplazo.



**INGENIERÍA**  
**GESTIÓN DE ACTIVOS**  
**CONFIABILIDAD**  
**MONITOREO DE CONDICIÓN**



**Proveemos Soluciones  
orientadas a mejorar  
la Seguridad, Rendimiento,  
Confiabilidad y Costos durante  
el Ciclo de Vida de sus Activos**

Soluciones de Ingeniería  
y Mantenimiento, S.L.  
Paseo de la Castellana, 95, 15ª 28046  
Madrid ESPAÑA

**www.sim-sl.com**  
+34 914 185 070  
+34 917 577 400  
**info@sim-sl.com**

# Perfilaje Gamma de Columnas de Fraccionamiento:

## Herramienta Preventiva de Excelencia

**Gamma Scan.** El uso de esta técnica nuclear permite realizar una evaluación preventiva en función de no afectar el medio ambiente



**Mauricio Vernal L.**

Ingeniero/Operador Nivel 3 – ISTR

Experto Internacional para IAEA

MSc Ingeniería Industrial (C)

Ingeniero Químico

CEO *SI3 Ingeniería SpA*

www.si3.cl

**Resumen del artículo (Abstract).**

Continuamente, personal de planta se enfrenta a problemas con sus columnas de fraccionamiento. De acuerdo al impacto que puede tener cada problema en la operación de la planta es la priorización en cuanto a resolverlo. El problema puede ser operacional producido por un problema mecánico o mecánico producido por un problema operacional. Esto puede afectar el rendimiento, la calidad del producto, tiempo, mano de obra y finalmente se medirá en cuanto a la pérdida monetaria de producción.

La aplicación de tecnologías nucleares como el Gamma Scan en este tipo de equipos permite evaluar el perfil de densidades del comportamiento fluidodinámico de la columna, pudiendo, a través de este perfil, inferir el estado de internos de la columna, como bandejas, chimeneas, rellenos, demister pads, etc., sin detener la operación la misma, lo que permite planificar los recursos necesarios para una próxima detención y definir si es necesario detener y abrir esta columna o mantenerla operando aplicando algunos cambios operacionales, generando ahorros y alargando el tiempo de operación de la columna.

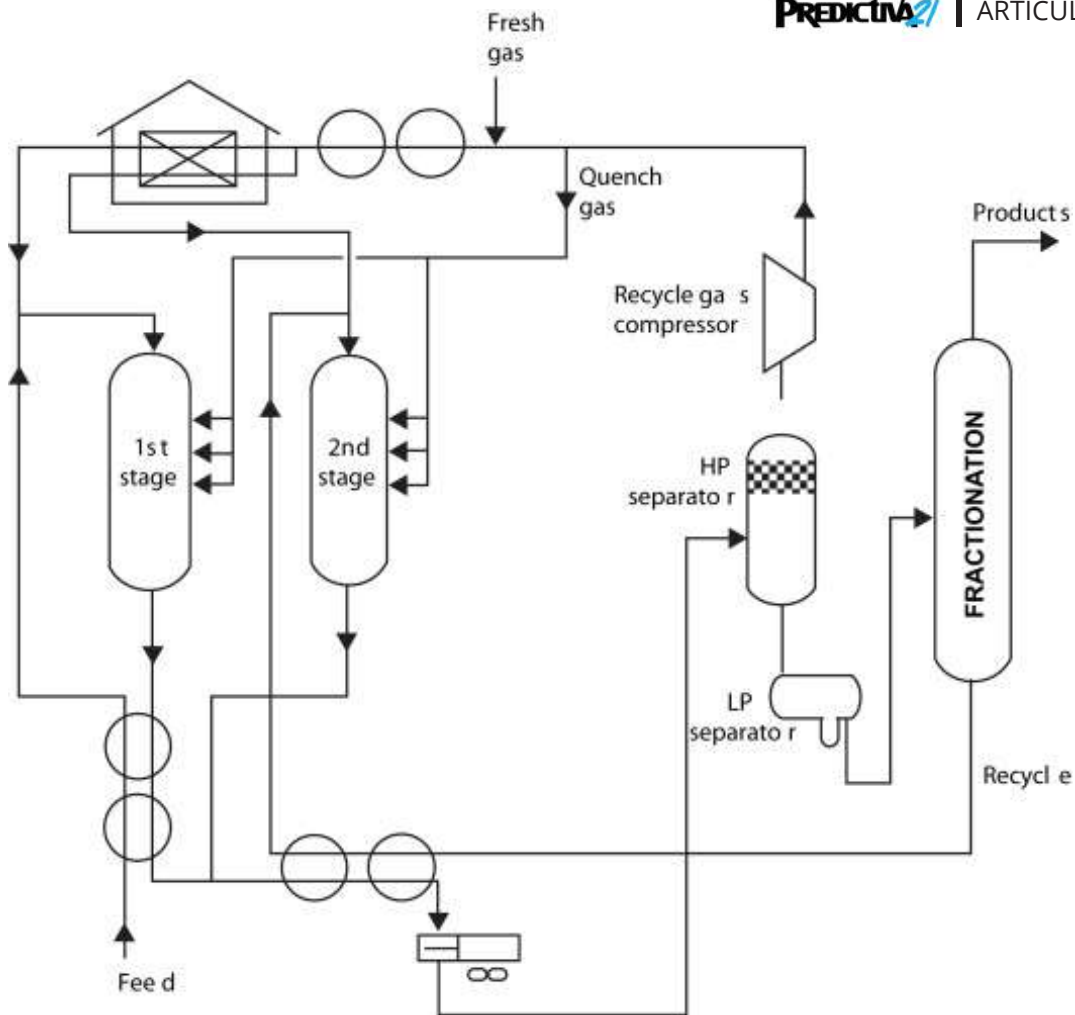
**Objetivos (del estudio).**

En general, el principal objetivo de la aplicación de esta tecnología es evaluar el estado actual de las columnas para tomar la decisión de realizar o no realizar mantención en ellas para la próxima detención de planta, y en caso positivo, contar con los recursos necesarios (repuestos y rhh) con anticipación, mejorando la disponibilidad del equipo, utilizando la técnica de Gamma Scan.

**Fig.1.** Columna de fraccionamiento

El perfilaje gamma o "Gamma Scan", permite evaluar el comportamiento fluidodinámico-operativo del sistema al interior de la torre, con lo que es posible inferir el estado de los internos como bandejas, demisters, rellenos u otras estructuras. A través del análisis de estos factores, se pueden identificar los motivos por los cuales la columna puede presentar problemas operativos degenerantes como inundación, presencia de espuma, lluvia, arrastre, etc.





**Fig.2.** Diagrama (simple) del proceso de Hydrocracking.

Hemos realizado a la fecha, más de 160 inspecciones, tanto en refinerías de petróleo como en plantas químicas y de producción de pulpa de celulosa.

## Antecedentes

Muchas veces, la investigación del problema puede involucrar a distintos departamentos de la planta, como ingeniería, mantención, producción así como asesores externos. Esta investigación, que puede llevar semanas para dilucidar el problema que está afectando a la columna en cuestión (con el consecuente costo asociado) y su efecto, puede abarcar a más de una unidad de producción.

Finalmente, si no es posible resolver el problema con todos los antecedentes recabados por el personal y los ajustes operativos necesarios, será imperioso detener la columna e inspeccionar su interior, lo cual puede impactar fuertemente en la producción, pérdidas que son fácilmente cuantificables.

Solo una vez abierta la columna (luego de purgar, limpiar, descontaminar, etc.), es posible evaluar la magnitud del problema, ya sea por una falla mecánica o suciedad de la unidad. Es posible que sea necesario solicitar repuestos, para lo que habrá que cerrar la columna para nuevamente abrirla cuando estos arriben a la planta, o peor aún, que la columna no tenga ningún problema evidente en su interior. Cualquiera sea el caso, implicará costos extra significativos, además de riesgos en la seguridad del personal.

## Metodología empleada

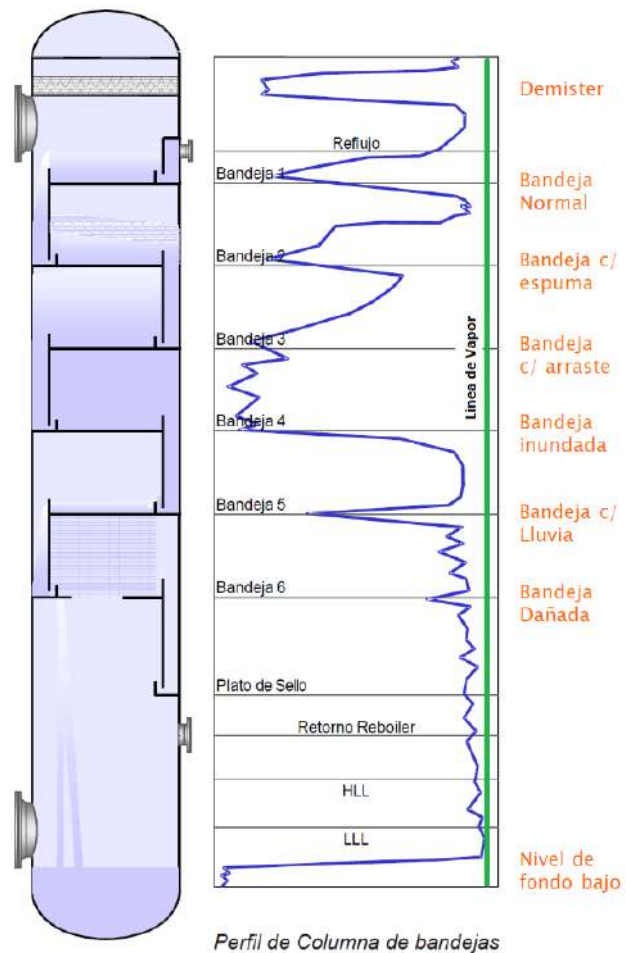
El perfilaje gamma o "Gamma Scan", es una poderosa herramienta de diagnóstico nuclear que hace uso de la propiedad que tiene la radiación gamma de alta energía de atravesar estructuras permitiendo "ver" en su interior el desplazamiento de materiales, sin detener la operación de la columna. Con la información que el Gamma Scan entrega, es posible determinar los motivos por los que la columna puede estar operando

de manera deficiente y poder definir si es un tema operativo o mecánico y así optimizar tiempo y recursos. Por ejemplo, si el Gamma Scan indica que existen bandejas dañadas, el operador puede determinar cuándo es necesario detener la columna para reparaciones, sin necesidad de abrirla. Así, la columna se mantiene operando mientras se adquieren los repuestos, partes y piezas necesarias para esa detención planificada con anterioridad.

Esta técnica consiste en el desplazamiento de una fuente de radiación gamma y un detector apropiado por lados opuestos de una columna de destilación, reactor u otro tipo de estructura de modo de registrar la cantidad de radiación gamma que es capaz de atravesarla. Esa cantidad de radiación es inversamente proporcional a la densidad y cantidad de material que se ha interpuesto en su camino, obteniéndose finalmente un perfil de densidad de la columna que es empleado para evaluar tanto el estado de los internos de la columna como sus condiciones de operación.

### La técnica permite determinar:

- Posición de los internos
- Bandejas normales o dañadas
- Mala distribución en rellenos
- Desmoronamiento de rellenos
- Inundación, Arrastre, Lluvia o Espuma
- Problemas con nivel de fondo
- Problemas con temperatura
- Diferencias entre condiciones operacionales



**Fig.3.** Perfiles patrones de un estudio de Gamma Scan



## Resultados

Como resultado, se obtienen perfiles de densidad relativa de los cuales se infiere el estado interno de la columna, permitiendo diagnosticar el proceso en particular. Con esta información, es posible planificar con anticipación la apertura de las columnas en una detención de planta con repuestos y recursos disponibles ya en el lugar de trabajo, con el consecuente ahorro de tiempo, producción y dinero.

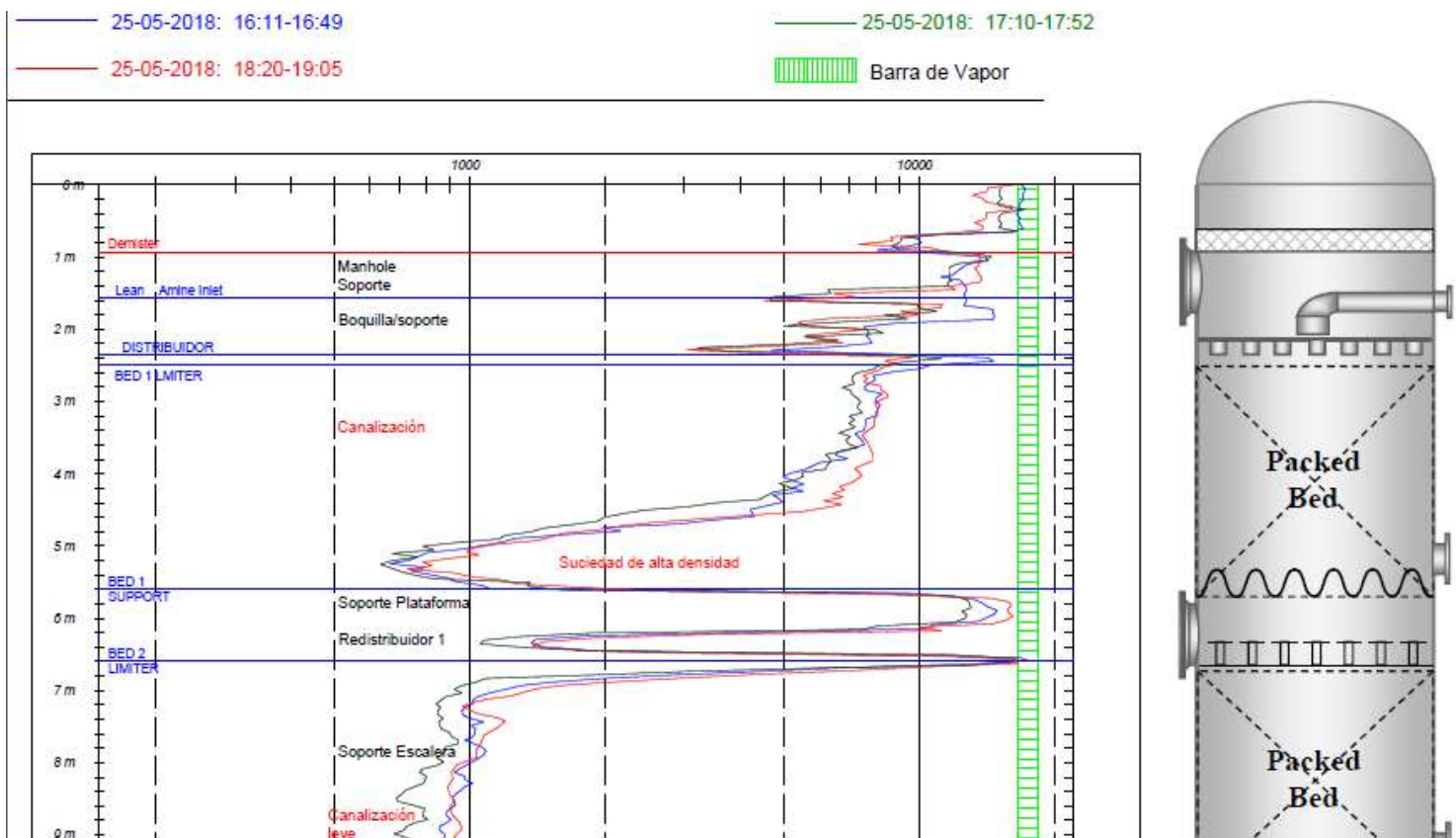
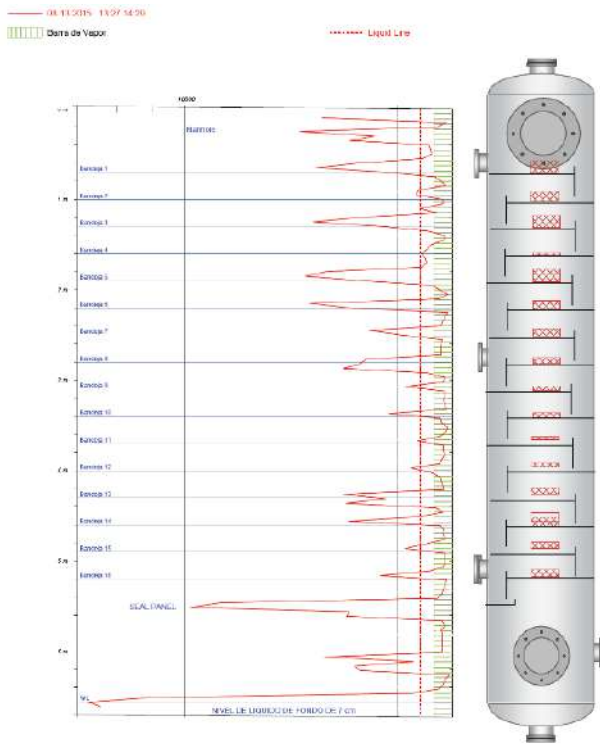


Fig.4. Empaque colapsado tope columna

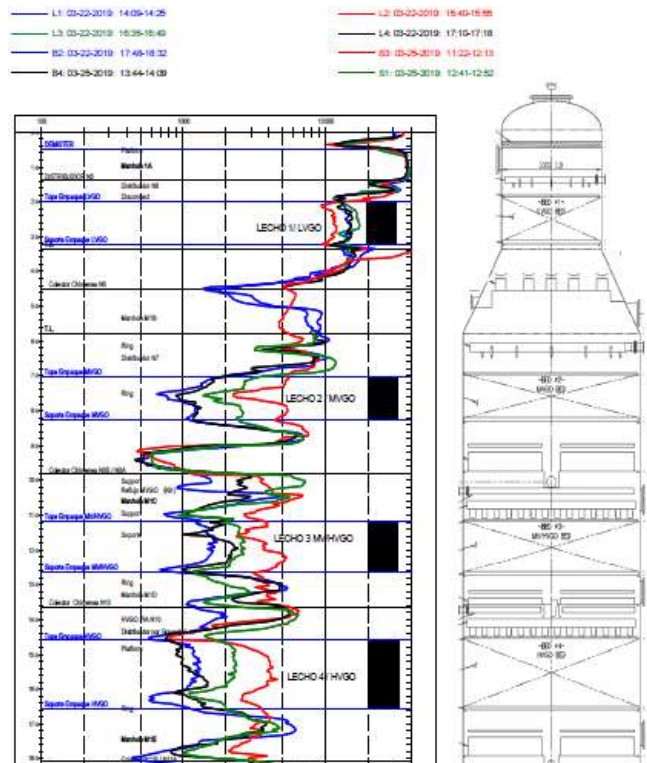
**En una oportunidad, se verificó que una de las columnas (Scrubber, Fig. 4) se mantenía operando con el tope empacado degradado o colapsado, lo que claramente afectaba su buen funcionamiento.**

En el caso de una columna de Metanol (Fig. 5) esta se encontraba con varias de sus bandejas colapsadas, situación que explicaba bastantes problemas operativos aguas abajo, como el aumento de ingreso de otros componentes para obtener las concentraciones necesarias de metanol a la salida de la columna.

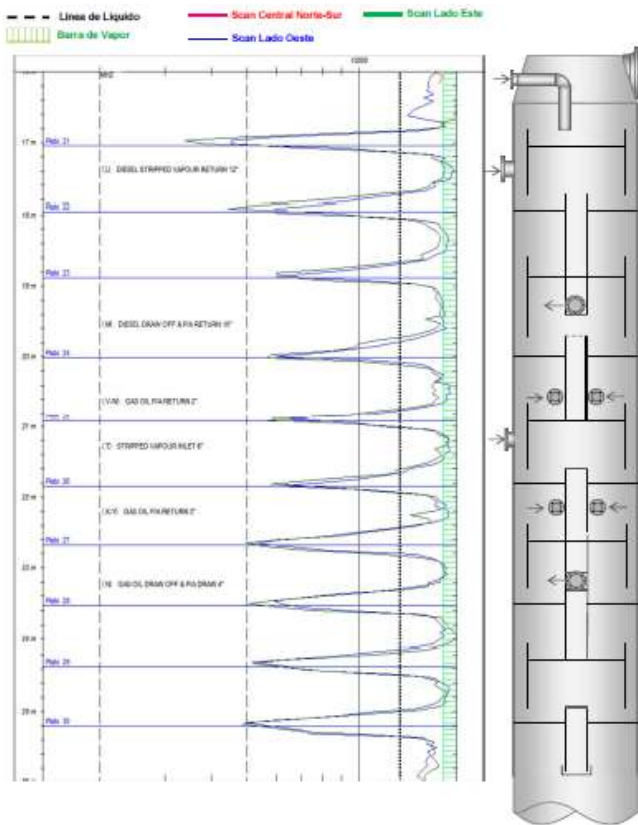
La figura N° 6 corresponde a una columna de vacío que se encuentra con canalización en cada uno de sus lechos, lo que afecta la calidad de sus productos.



**Fig.5.** Columna de Metanol con Bandejas caídas.



**Fig.6.** Columna de Vacío con relleno gravemente canalizado.



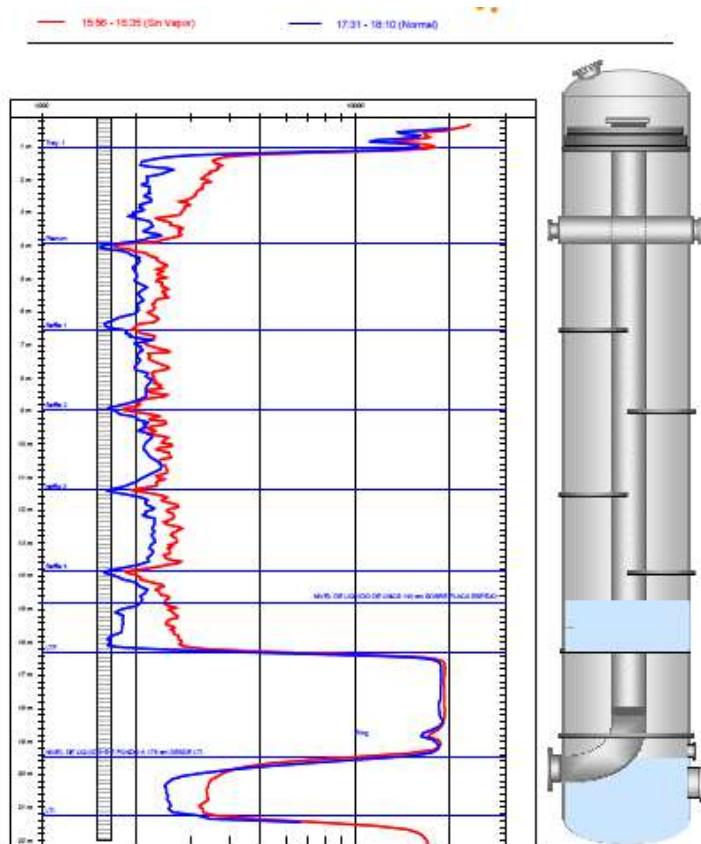
**Fig.7.** Columna en buen estado.

## Conclusiones

La continuidad operativa de cualquier proceso de fraccionamiento o separación dependerá en gran manera del buen estado mecánico/operativo de las columnas que son parte de este. Si estas columnas fallan, la confiabilidad de su proceso productivo y de productos fuera de especificación amenazarán la continuidad operativa, en especial en plantas donde se necesitan distintas columnas para obtener un producto final, ya que la interrupción de un equipo, afectaría el rendimiento global.

Por lo anterior es muy útil realizar auditorías periódicas al funcionamiento y estado interno de estos equipos con tecnologías avanzadas y que permitan la confiabilidad y continuidad operacional.

Si esto puede hacerse con los equipos en servicio, se pueden definir los requerimientos de mantenimiento con anterioridad a la Parada de planta, lo que es muy beneficioso en la planificación de los recursos técnicos y de repuestos de tal manera de asegurar una mantenimiento efectiva y que de confiabilidad a las operaciones.



**Fig.8.** Efecto Evaporador con Thin Film con líquido condensado en su interior, planta de celulosa.


El Gamma Scan responde a este tipo de tecnologías con una capacidad única: “ver” al interior de la columna, sin detener su operación, lo que permite tomar decisiones críticas en el menor tiempo posible.

Hemos extendido el uso de esta herramienta a plantas de producción de Pulpa de Celulosa. La continuidad operativa de una planta de este tipo dependerá de continuidad de la planta evaporadora y por consiguiente de la planta de celulosa completa, dado que si no se puede depurar el condensado entonces no puede ser consumido en otras áreas y tampoco puede ser descartado al efluente por el impacto ambiental que ello significa; por lo que habría que detener el proceso que lo genera, es decir, la misma planta evaporadora.

Si bien el uso más conocido del Perfilaje de Columnas (Gamma Scan) es en columnas de fraccionamiento de petróleo, su aplicación en plantas de Celulosa, especialmente en el área de evaporadores en las torres de depuración se ha convertido en una herramienta muy importante para la programación de las detenciones de planta, mejorando la asignación de recursos, aplicándose incluso a evaporadores tipo Thin Film, mejorando la eficiencia global de la planta.

## Referencias:

- 1 ISTR: International Society for Tracer and Radiation Applications <https://istra-society.org/official-trainers-examiners.html>
- 2 IAEA: International Atomic Energy Agency <https://www.iaea.org/>



# ANÚNCIATE AQUÍ

Tenemos un espacio para ti

Contáctanos: [contacto@predictiva21.com](mailto:contacto@predictiva21.com)

**PREDICTIVA**21

# Calculando la frecuencia óptima de inspección

Considerando costos, riesgo y desempeño  
Caso de estudio basado en métodos y normas vigentes

**Anticipar.** La medición de costo-riesgo permite predecir el qué hacer y el cuándo en la gestión de activos.



**Edgar Fuenmayor**

Ing. MSc. CMRP

edgarfuenmayor1@gmail.com

## Resumen

Las buenas prácticas descritas en las normas ISO 55000 “Gestión de Activos” y UNE - EN 16646 “Mantenimiento en la Gestión de los Activos Físicos”, establecen que toda organización debe aprovechar el valor potencial de sus activos durante el tiempo de vida. Esto incluye en primer lugar la determinación para incorporar nuevos activos para luego operarlos, mantenerlos, mejorarlos y desincorporarlos en el momento oportuno.

Los requisitos de las actividades de mantenimiento no permanecen estables, sino que cambian cuando cambian los entornos de negocio y tecnológicos. Por lo tanto, la función de mantenimiento debería evaluar continuamente sus objetivos y sus modos de funcionamiento y modificarlos cuando sea necesario. Esto implica la actualización de los planes de mantenimiento, desarrollo y reestructuración de recursos y evaluación de procesos y redefinición de los existentes. Por esta razón, el objetivo del departamento de mantenimiento de una organización es prevenir o mitigar el deterioro del desempeño de los activos en servicio y gestionar el riesgo de una falla cuando se pierde la función deseada del activo. Es una muy buena práctica de gestión de activos tener una lista de estrategias de mantenimiento para asegurar un nivel aceptable y predecible del desempeño a través de la vida útil del activo. Esto incluye inspecciones, monitoreo o pruebas en línea y política de mantenimiento preventivo (basado en el tiempo, basado en la condición, y basado en el uso). Normalmente, los fabricantes o proveedores de equipos entregan una lista de tareas de mantenimiento e inspección y la frecuencia de aplicación la cual no corresponde con el contexto operacional actual, la vida/edad del activo y las consecuencias de la falla del activo en el negocio. En este trabajo se mostrará un modelo matemático a través de una hoja de cálculo para determinar la frecuencia óptima de inspección considerando los costos, riesgo y desempeño.

**Palabras Claves:** Functional Failure, Deterioro, Activo Físico, Reliability, Disponibilidad, Ingeniería de Confiabilidad, Mantenibilidad, Life Cycle Costing, Inspección, Función.

## 1.- Introducción

Las empresas desarrollan planes de mantenimiento para garantizar el continuo servicio de sus sistemas, equipos y máquinas de tal manera de incrementar la confiabilidad y disponibilidad. En las últimas décadas, el mantenimiento ha sido protagonista del éxito, en la medida que las empresas se hacen más sólidas y confiables, al comprender que un mantenimiento mal planificado es responsable y limita los volúmenes de producción, afecta la calidad, deteriora el servicio al cliente, condiciona accidentes y daño al medio ambiente y origina costos indirectos que superan largamente el costo tradicional del mantenimiento planificado.

La idea general del mantenimiento está cambiando cada día, estos cambios se deben al aumento de mecanización, es decir, mayor complejidad de la maquinaria, las nuevas técnicas de mantenimiento y nuevos enfoques en las empresas y organizaciones. El mantenimiento también está reaccionando ante nuevas expectativas; esto incluye una mayor importancia a los aspectos de seguridad y ambiente, un conocimiento en la conexión existente entre el mantenimiento y la calidad del servicio o producto y un aumento de la presión ejercida para seguir una alta disponibilidad de los equipos y maquinaria.

Estos cambios ponen a prueba las actitudes y conocimientos del personal; dicho personal de mantenimiento que va del mecánico al gerente, deben adoptar nuevas formas de pensar y actuar, buscando un nuevo camino para evitar ineficiencias en el mantenimiento, tratando de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances, de forma que puedan evaluarlos racionalmente y aplicar aquellos que sean de mayor validez para ellos y su corporación.

**La función de mantenimiento debería evaluar continuamente sus objetivos y sus modos de funcionamiento y modificarlos cuando sea necesario actualizando planes y procesos.**



Debido a la necesidad de incrementar la confiabilidad y disponibilidad de los activos físicos se hace perentorio la elaboración o diseño de planes de mantenimiento haciendo uso de las metodologías desde la etapa temprana del ciclo de vida del activo tales como (RCM, FMECA, FMEA, RBI), para de esta manera adecuar el plan de cuidado del activo al contexto actual. Por otro lado es sumamente importante definir el intervalo óptimo de la frecuencia de inspección de los activos basados en el deterioro de los equipos para el monitoreo de la condición y por ende se requiere conocer la frecuencia optima de inspección la cual debe ser oportuna para evitar la falla funcional del equipo. (Fuenmayor, 2017)

## 2.- Modelo de Decisión Costo – Riesgo

Para determinar la frecuencia óptima de inspección se requiere de la construcción de dos curvas. Una que representa el costo asociado a las diferentes políticas de inspección modelado a diferente frecuencia y otra que indica los costos de riesgo asociado a una falla o pérdida de la función primaria o secundaria del activo físico (Riesgo = Probabilidad de Falla x Consecuencia). Estas dos curvas se combinan en un modelo de decisión conocido como Modelo “Costo/Riesgo” (Woodhouse, 1993).

En años recientes grandes corporaciones industriales, especialmente del sector de hidrocarburos y de la industria de proceso, han volcado su atención hacia el modelo de decisión “Costo-Riesgo”, debido a que el mismo permite comparar el costo asociado a una acción de mantenimiento contra el nivel

de reducción de riesgo o mejora en el desempeño debido a dicha acción; en otras palabras, el modelo permite saber “cuanto se obtiene por lo que se gasta”.

El análisis “Costo – Riesgo” resulta particularmente útil para decidir en escenarios en intereses en conflicto, como el escenario “Operación – Mantenimiento”, por una parte el departamento de operaciones requiere que el equipo o proceso opere por un tiempo prolongado para alcanzar las metas de producción y, simultáneamente, por otro lado, el departamento de mantenimiento requiere que el proceso o el activo físico se detenga con cierta frecuencia para poder intervenirlos y poder ganar confiabilidad en ellos. El modelo Costo – Riesgo es el indicado para resolver el conflicto previamente mencionado, dado que permite determinar el nivel óptimo de riesgo y la cantidad adecuada de inspección para obtener el máximo beneficio o mínimo impacto en el negocio.

En el modelo Costo – Riesgo pueden destacarse tres curvas que varían en el tiempo:

- La curva del nivel de riesgo (Riesgo = Probabilidad x Consecuencia). Entre las variables a considerar para el cálculo de riesgo se encuentran el incremento de la tasa de falla conllevando a la reducción de la confiabilidad o incremento de la probabilidad de falla, incremento de los costos operacionales, pérdida de desempeño entre otras variables. Esta curva es ascendente en el tiempo.

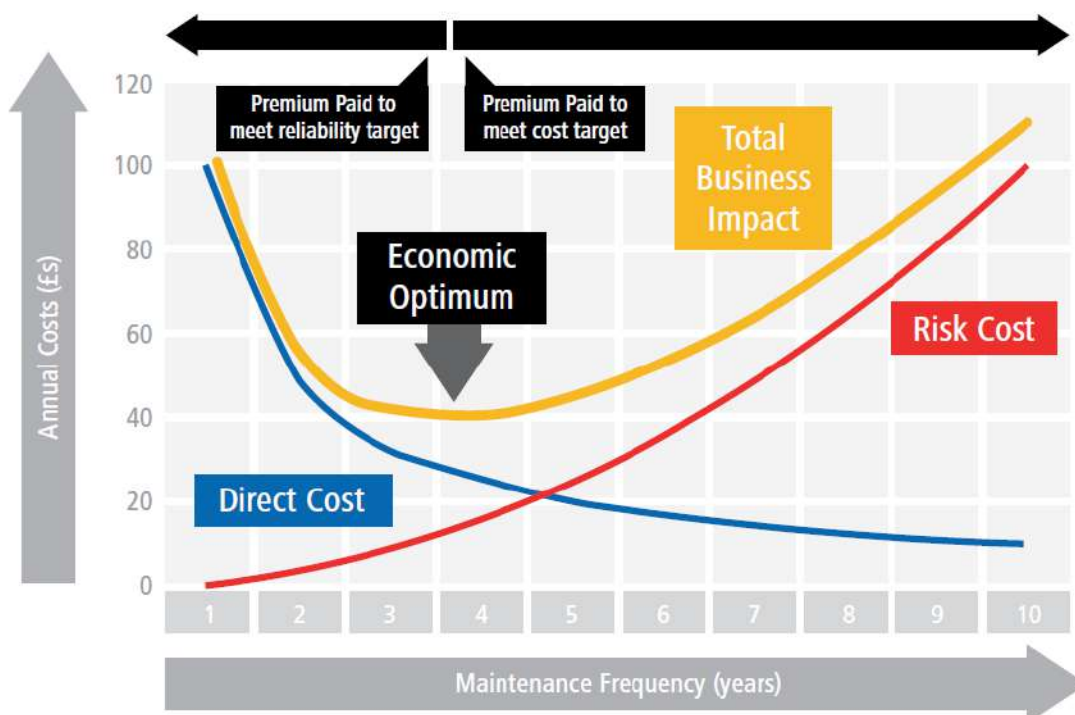


Figura 1. Optimización de la frecuencia de inspección. Fuente: Asset management an anatomy. IAM. 2015

- La curva del costo de inspección (Costos Directos + Costos Indirectos), en la cual se simulan los costos de diferentes frecuencias para la acción de inspección. Esta curva es descendiente en el tiempo.
- La curva de impacto total al negocio, que resulta de la suma punto a punto de la curva de riesgo y la curva de los costos de inspección. El "mínimo o punto de inflexión" de esta curva representa el "mínimo impacto posible en el negocio" y está ubicado sobre el valor que puede traducirse como el periodo o frecuencia óptima para la realización de la acción de mantenimiento. Llevar a cabo la inspección a la izquierda de este punto nos llevaría a incurrir en un costo muy alto. Llevar a cabo la inspección a la derecha de este punto sería asumir mucho riesgo, por esta razón la recomendación es realizar la inspección en el punto óptimo de la curva de impacto total al negocio.

La dificultad para el uso del modelo, se centra en la estimación o modelaje de la curva del riesgo, ya que la misma requiere la estimación de la probabilidad de falla (y su variación con el tiempo) y las consecuencias (Woodhouse, 1993).

El riesgo, base fundamental del modelo de decisión descrito anteriormente, es un término de naturaleza probabilística, que se define como la "probabilidad de tener una pérdida" y comúnmente se expresa en unidades monetarias. Matemáticamente, el riesgo se calcula con la siguiente ecuación:

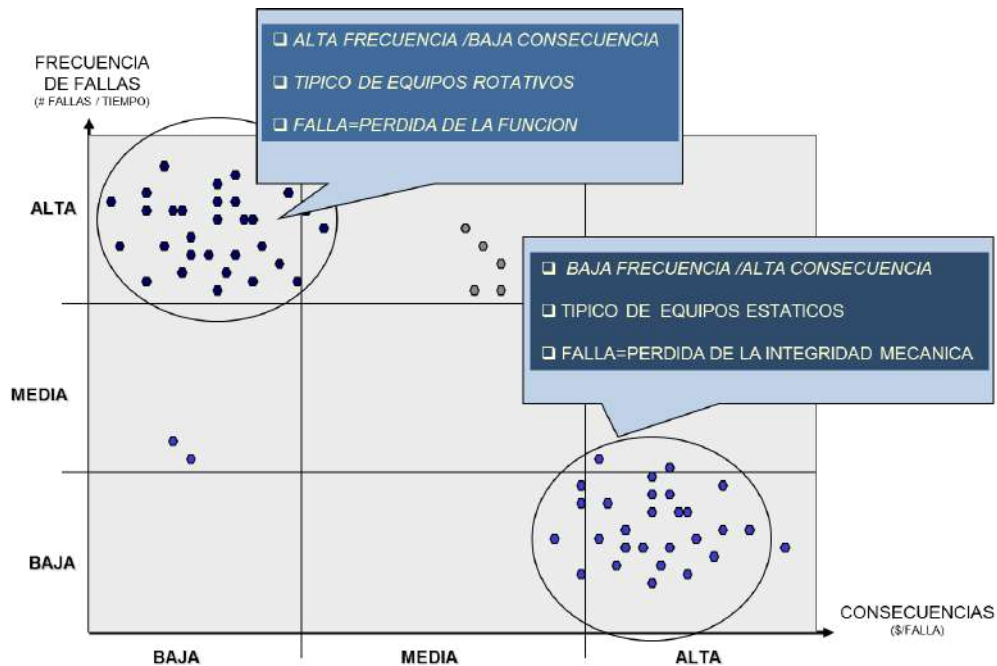
$$\text{Riesgo (t)} = \text{Probabilidad de falla} \times \text{Consecuencias de la Falla}$$

El análisis de la ecuación del riesgo, permite entender el poder de este indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias, permitiendo la comparación de unidades como los equipos dinámicos, que normalmente presentan altas frecuencias de fallas con bajas consecuencias, con equipos estáticos, que normalmente presentan patrones de baja frecuencia de fallas y alta consecuencia.

El riesgo se comporta como una balanza, que permite pesar la influencia de ambas magnitudes (Probabilidad de falla y Consecuencia de la falla) en una decisión particular. El mantenimiento moderno, sustentado en la Ingeniería de la Confiabilidad, requiere de un cuidadoso proceso de diagnóstico de equipos y sistemas. El diagnóstico, basado en el "riesgo", puede entenderse entonces como un proceso que busca caracterizar el estado actual y predecir el comportamiento futuro de equipos y sistemas.

Para el logro de un diagnóstico integrado el riesgo debe calcularse usando toda la información disponible; es decir, debe incluir el análisis del historial de fallas, los datos de condición y datos técnicos. De esta forma, se podrán identificar las acciones correctivas y preventivas que puedan efectivamente optimizar costos y minimizar su impacto en el negocio medular. (Woodhouse, 1993)

Entendiendo entonces que el "riesgo" es el indicador para un diagnóstico integrado, se analizará a continuación, con el máximo detalle posible el proceso para estimarlo. La siguiente Figura 2 muestra gráficamente la descomposición del indicador riesgo.



**Figura 2.** Proceso de diagnóstico. Descomposición del indicador riesgo  
Fuente: Curso sobre frecuencia óptima de inspección y mantenimiento. TWPL. 1999

### 3.- Propósito de la Inspección

El propósito de la inspección podría ser detectar a tiempo algún evento no deseado que pueda afectar la seguridad del hombre o impactar al ambiente así como mejorar la rentabilidad del negocio, ya que se puede anticipar la falla funcional. Cuando las fallas funcionales de los activos físicos no impactan considerablemente a las organizaciones desde el punto de vista económico quizás no sería necesario invertir dinero y tiempo en una ruta de inspección ya que la inspección genera un costo (Directo + Indirecto) lo cual no es rentable para el negocio. Los propósitos principales de una inspección son:

- Detectar o monitorear el riesgo de una falla de tal manera de evitar una catástrofe o evento con consecuencias graves a través del monitoreo de la condición del activo.
- Detectar la falla de una función que ya ha ocurrido y no es evidente al personal de operaciones.

La mayoría de los modos de falla no ocurren instantáneamente del todo. En tales casos, es muy posible detectar que los elementos concernientes se encuentran en etapas finales de deterioro antes de alcanzar su estado de falla. Esta evidencia de falla inminente se conoce como "falla potencial", la cual se define como "una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en un proceso de ocurrencia". Si esta condición puede ser detectada, podría ser posible tomar acción para prevenir que el elemento falle completamente y/o evitar las consecuencias del modo de falla. (SAE JA1012, 2002)

La Figura 3 ilustra lo que ocurre en las fases finales del proceso de falla. Esta se llama curva P-F, porque muestra como comienza una falla, deteriora hasta el punto en el cual puede ser detectada ("P") y entonces, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose usualmente a una velocidad acelerada hasta que alcanza el punto de falla funcional ("F").

Si se detecta una falla funcional entre el punto P y el punto F de la Figura 3, este es el punto en el cual podría ser posible tomar acción para prevenir la falla funcional y/o evitar sus consecuencias (si es posible o no tomar una acción significativa dependerá de cuán rápido ocurre la falla funcional). Las tareas diseñadas para detectar las fallas potenciales se conocen como tareas basadas en condición.

Las tareas basadas en condición se llaman así porque los elementos se inspeccionan y se dejan en servicio bajo la condición de que continúen obteniéndose los estándares de operación especificados en otras palabras, bajo la condición que el modo de falla en consideración improbablemente ocurra antes de la próxima revisión. Esto también se conoce como mantenimiento predictivo (porque nosotros estamos tratando de predecir si y posiblemente cuando el elemento va a fallar en base a su comportamiento actual) o mantenimiento basado en condición (porque la necesidad de una acción correctiva o para evitar consecuencias está basada en una evaluación de la condición del elemento). (SAE JA1012, 2002)

### 4.- Tareas Basadas en Condición

Cualquier tarea basada en condición que se seleccione ( predictiva, basada en condición o tarea de monitoreo de condición) debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

- Debe existir una falla potencial claramente definida.
- Debe existir un intervalo P-F identificable (o período para el desarrollo de falla).
- El intervalo de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F probable más corto.
- Debe ser físicamente posible realizar la tarea en intervalos menores que el intervalo P-F.
- El tiempo más corto entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional (el intervalo P-F menos el intervalo de la tarea) debe ser suficientemente largo para predeterminar la acción a ser tomada a fin de evitar, eliminar o minimizar las consecuencias del modo de falla.

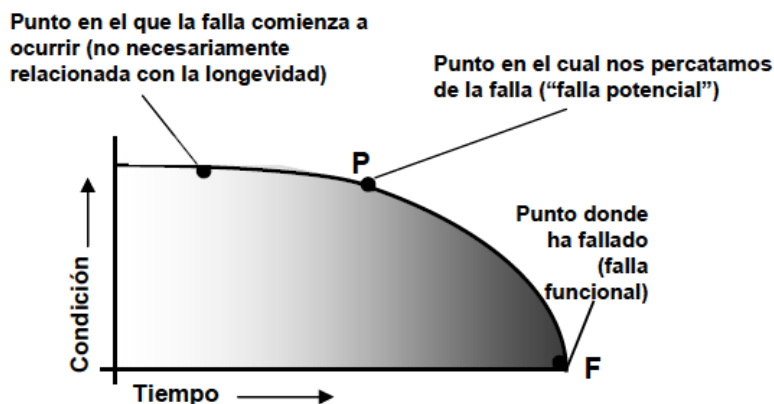
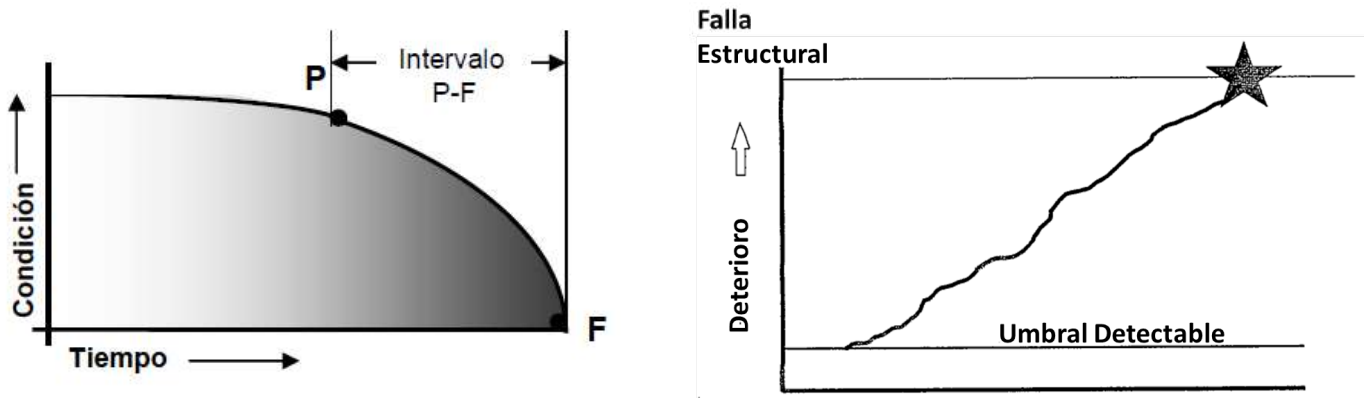


Figura 3. La curva P - F. Fuente: Norma de mantenimiento centrado en confiabilidad. SAE JA1012. 2002

En adición a la falla potencial, también es necesario considerar la cantidad de tiempo (o el número de ciclos de esfuerzo) que transcurre entre el punto en el cual ocurre la falla potencial en otras palabras, el punto en el cual se hace identificable y el punto en el que se deteriora hacia una falla funcional. Como se muestra en la Figura 4, este intervalo se conoce como el intervalo P-F, así mismo se muestra el desarrollo progresivo del deterioro a la falla.



**Figura 4.** El intervalo P – F y progreso del deterioro a la falla  
Fuente: Norma de mantenimiento centrado en confiabilidad. SAE JA1012. 2002

El intervalo P-F determina que tan frecuente se deben hacer las tareas basadas en condición. Para detectar la falla potencial antes que se convierta en una falla funcional, el intervalo entre revisiones debe ser menor que el intervalo P-F. También es esencial que la condición de la falla potencial sea lo suficientemente clara para tener la certeza de que la persona que está entrenada para realizar la revisión, detectará la falla potencial siempre y cuando ocurra (o al menos, que la probabilidad de que la falla potencial no sea detectada sea suficientemente baja para reducir la probabilidad de un modo de falla no anticipado a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo). (SAE JA1012, 2002)

El intervalo P-F también se conoce como período de advertencia, el tiempo que conduce hacia una falla funcional o el período de desarrollo de la falla. Este se puede medir en cualesquiera unidades que provean una indicación de la exposición al esfuerzo (tiempo de operación, unidades de producción, ciclos parada-arranque, etc.). Para diferentes modos de falla, estos varían de fracciones de segundo a varias décadas.

Nótese que si se realiza una tarea basada en condición a intervalos que son más largos que el intervalo P-F, existe una posibilidad de que la falla potencial sea abandonada del todo. Por otro lado, si se realiza la tarea a fracciones muy pequeñas del intervalo P-F, los recursos serán gastados en el proceso de revisión. En la práctica, los intervalos de las tareas siempre se

deben seleccionar para ser más cortos que el más corto intervalo P-F probable. En la mayoría de los casos, es suficiente seleccionar un intervalo de tarea igual a la mitad del intervalo P-F. Sin embargo, algunas veces es apropiado seleccionar intervalos de tarea que sean alguna otra fracción del intervalo P-F. Esto se puede regir por el intervalo P-F neto requerido (como se discute más adelante), o puede ser porque el usuario del activo tiene datos históricos relevantes que dictaminan que una fracción diferente es apropiada. (SAE JA1012, 2002)

## 5.- El Intervalo Neto P – F

El intervalo P-F rige la duración del período disponible para tomar cualquier acción necesaria con la finalidad de reducir o eliminar las consecuencias del modo de falla. Para que una tarea basada en condición sea técnicamente factible, el intervalo neto P-F debe ser mayor que el periodo requerido para evitar o reducir las consecuencias del modo de falla. Si el intervalo neto P-F es demasiado corto para tomar una acción sensata, entonces la tarea basada en condición no es técnicamente factible. En la práctica, el período requerido varía ampliamente. En algunos casos, puede ser una cuestión de horas (decir hasta el final de un ciclo de operación o el fin de un cambio) o incluso minutos (parar una máquina o para evacuar un edificio). En otros casos, pueden ser semanas o incluso meses (decir hasta un mantenimiento mayor). En general, se desean intervalos P-F mayores por dos razones:



a) Es posible hacer cualquier cosa necesaria para evitar las consecuencias del modo de falla (incluyendo la planeación de la acción correctiva) de una manera más considerada y por demás controlada.

b) Se requieren menos inspecciones basadas en condición.

Por esta razón se invierte mucha energía para encontrar las condiciones de la falla potencial y las técnicas basadas en condición que suministran posibles intervalos P-F mayores. Sin embargo; en algunos casos, es posible utilizar intervalos P-F muy cortos.

## 6.- Categorías de Técnicas Basadas en Condición

Las cuatro categorías mayores de técnicas basadas en condición son las siguientes:

a) Las técnicas basadas en las variaciones de la calidad del producto. En muchos casos, la emergencia de un defecto en un artículo producido por una máquina está directamente relacionada a un modo de falla de la misma. Muchos otros defectos surgen gradualmente, y así proveen evidencia oportuna de fallas potenciales.

b) Técnicas de monitoreo de efectos primarios. Los efectos primarios (velocidad, caudal de flujo, presión, temperatura, potencia, corriente, etc.) son otras fuentes de información acerca de las condiciones del equipo. Los efectos pueden ser monitoreados por una persona a través de la lectura de un indicador, por un computador como parte de un sistema de control de procesos, o por un registrador de mapas.

c) Técnicas basadas en los sentidos humanos (observar, escuchar, sentir, y oler).

“ El intervalo P-F rige la duración del periodo para tomar cualquier acción”.

d) Técnicas de monitoreo de condición. Estas son técnicas para detectar fallas potenciales que involucran el uso de equipo especializado (el cual algunas veces, se incorpora al equipo que se está monitoreando). Estas técnicas son conocidas como monitoreo de condición para distinguirlas de otros tipos de mantenimiento basados en condición.

Muchos modos de falla son precedidos por más de una - frecuentemente varias - fallas potenciales diferentes, así podría ser apropiada más de una categoría de tareas basadas en condición. Cada una de ellas tendrá un intervalo P-F diferente, y cada una requerirá diferentes tipos y niveles de habilidades. Esto significa que ninguna categoría de tareas por sí sola será siempre la más costo efectiva. Entonces, para evitar inclinaciones innecesarias en la selección de la tarea, es esencial:

a) Considerar todos los fenómenos detectables que probablemente precedan cada modo de falla, junto al rango total de tareas basadas en condición que puedan utilizarse para detectar esas advertencias.

b) Aplicar el criterio de selección de tareas del MCC rigurosamente para determinar cuales tareas (si existen) probablemente sean la manera más costo-efectiva de anticipar el modo de falla en consideración.

Nótese que cualquier dispositivo incorporado para determinar si un modo de falla está en proceso de ocurrir, debe satisfacer el mismo criterio para la factibilidad técnica y vale la pena hacerlo de cualquier mantenimiento basado en condición, con modos de falla adicionales, y se deben analizar conforme a ello. (SAE JA1012, 2002)

## 7.- Modelo para el Cálculo de la Frecuencia Óptima de Inspección

En la siguiente Figura 5 se muestran los cuatro parámetros más importantes en el cálculo de la frecuencia óptima de inspección tales como: Punto de inicio del deterioro, rata de deterioro, punto de falla y precisión en la medición. Cabe destacar, que el modelo considera el deterioro del activo permitiendo determinar la fecha para la próxima inspección. Este modelo tiene como limitación el cálculo del riesgo en cuanto a la determinación de las variables asociadas a las consecuencias de la pérdida de la función primaria o secundaria. Debe establecerse un programa de inspección en la organización de tal manera de poder construir la curva de tendencia del monitoreo de la condición o deterioro desde

el inicio de operación del activo o luego de una reparación mayor, es decir manejo del dato.

Es de resaltar la importancia de la aplicación del estándar API 580/581 debido al manejo de los diferentes mecanismos de deterioro y la estimación de las consecuencias, esto permitirá conocer la fecha para la próxima inspección para equipos de contención de energía. En este modelo se utilizó para pronosticar el deterioro la distribución probabilística Lognormal ya que es la distribución que muestra la cola más larga (ver Figura 7) para pronosticar el deterioro en comparación con las distribuciones (Weibull y Gamma), permitiendo una fecha para la próxima inspección más corta y de esta manera disminuir la probabilidad de alcanzar anticipadamente una falla funcional o pérdida de la función contención en equipos estáticos.

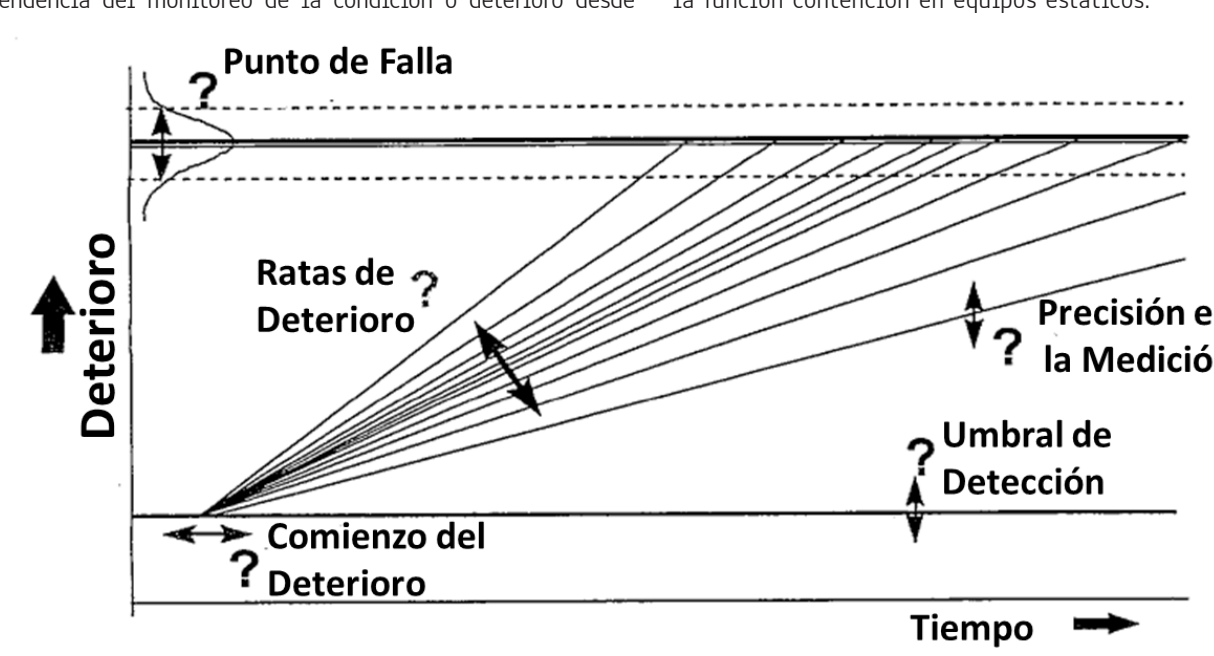


Figura 5. Combinando las incertidumbres. Fuente: Curso sobre frecuencia óptima de inspección y mantenimiento. TWPL. 1999

Generalmente no se conoce la rata en la cual el deterioro ocurrirá. En la siguiente Figura 6 se muestra la distribución de probabilidad de la variación del tiempo para la falla que podría ser esperado como resultado de la variación de la rata de deterioro.

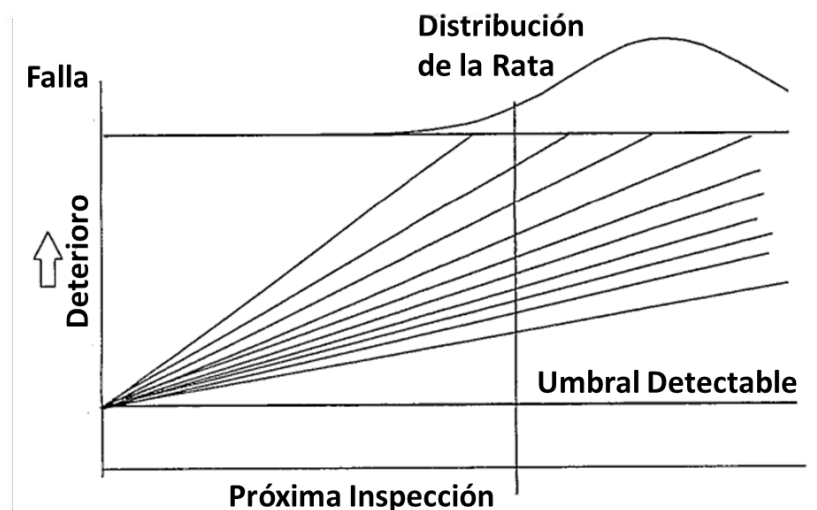


Figura 6. Distribución de tiempo para la falla. Fuente: Curso sobre frecuencia optima de inspección y mantenimiento. TWPL. 1999

En muchos casos, aunque el propósito de la inspección puede ser prevenir las consecuencias catastróficas de algún modo de falla (por ejemplo ruptura de un recipiente), puede haber otro nivel de falla antes del modo de falla crítico, es decir, pueden haber múltiples niveles de falla, como se muestra en la Figura 7.

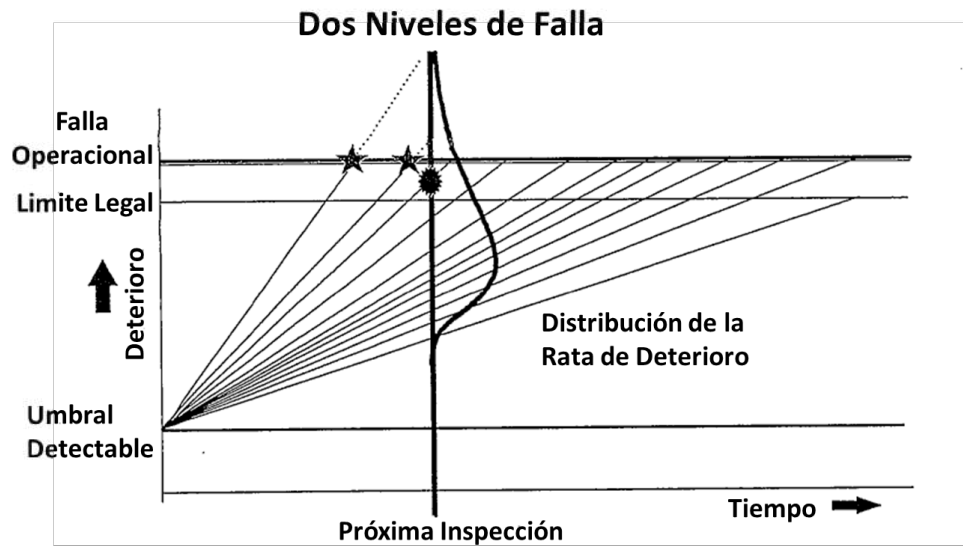


Figura 7. Múltiples niveles de falla. Fuente: Curso sobre frecuencia óptima de inspección y mantenimiento. TWPL. 1999

## 8.- Caso de Estudio. Tanque de Ácido Sulfúrico al 98%

En este caso de estudio se mostrará el análisis realizado con una hoja de cálculo, considerando todas las variables descritas en las primeras páginas de este documento. Adicionalmente, para validar los resultados arrojados por la hoja de cálculo se utilizaron los valores numéricos arrojados por un programa computacional de amplia trayectoria mundial en gestión de activos, lo que demuestra la certeza en los datos. Los datos son alterados por confidencialidad.

Se dispone de un tanque de ácido sulfúrico al 98% instalado en una planta petroquímica de operación continua por 20 años, en los cuales se ha cumplido con

las recomendaciones del licenciante y el departamento técnico en cuanto las acciones de mantenimiento en cada parada de planta. El Ingeniero de Confiabilidad asignado a la planta, luego de diseñar el plan de mantenimiento basado en la confiabilidad utilizando la metodología RCM, se dispone a optimizar la frecuencia de inspección de acuerdo al monitoreo de la condición tal como lo muestran los informes del departamento de inspección de equipos estáticos. De no llevar a cabo la acción de inspección se afectaría la confiabilidad del proceso productivo y las consecuencias serían graves debido a la pérdida de la función contención en cuanto a la afectación al hombre y al ambiente al igual que los costos operacionales se incrementarían, y disminuiría el desempeño del activo con el tiempo. En la siguiente Tabla 1 se muestran los datos de entrada al modelo matemático.



**Tabla N°1.** Estas tablas muestran el perfil del deterioro, punto actual de la falla operacional, costos de la falla, y costos (Directos + Indirectos) de la inspección. Fuente: Propia

**Datos Tarea de Inspección**

Tarea de Inspección: **Medición de Espesores**

Unidad de Tiempo a Utilizar: **Año**

Intervalo Actual de Inspección: **2** **Año**

Intervalo de Oportunidad: **0** **Año**

Unidad Monetaria: **USD**

Unidad de Deterioro: **mm**

Precisión en la Medición: **1** **mm**

Numero de Equipos: **1**

Costos de la Inspección		
Costo Directos (Labor + Materiales):	419	USD
Costos de Penalización (Perdida de Oportunidad, Downtime):	0	USD

**Punto Actual de Falla Operacional**

Por Límite Permisible de Deterioro	
Factor de Punto de Falla	0

Por Promedio e Incertidumbre			
Punto Promedio de Falla	4	mm(s)	Data de la Probabilidad Actual
Incertidumbre (+/-)	1	mm(s)	Probabilidad de límite Permisible

**Deterioro**

**Mecanismo de Deterioro** **Adelgazamiento**

**Comienzo**

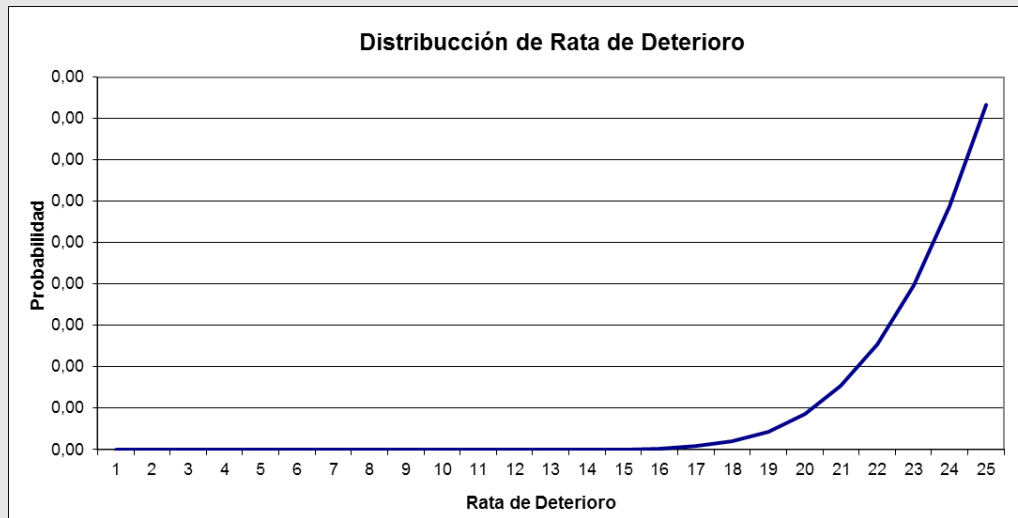
Medida Actual	16	mm(s)	<b>Inicio Aleatorio</b>
Límite de Diagnostico	0	mm(s)	
Frecuencia de Iniciación	0	/Año	

**Progresión**

Rata Promedio de Deterioro	0,058	mm(s)/Año
Caso Extremo	0,381	mm(s)/Año
No mas de	5	%Exceso

**Límite Permisible de Deterioro**

Límite Permisible	8,01	mm(s)
-------------------	------	-------



**Costos de la Falla**

**Costos y Consecuencias Pasando Límite Permisible**

Costos Directos (Labor + Materiales)	16913,6	16913,6	USD
Costos de Penalización ( Downtime, Perdida de Oportunidad)	0		

**Costos y Consecuencias de la Falla Operacional**

Costos Directos (Labor + Materiales)	239794,2	239794,2	USD
Costos de Penalización ( Downtime, Perdida de Oportunidad)	0		



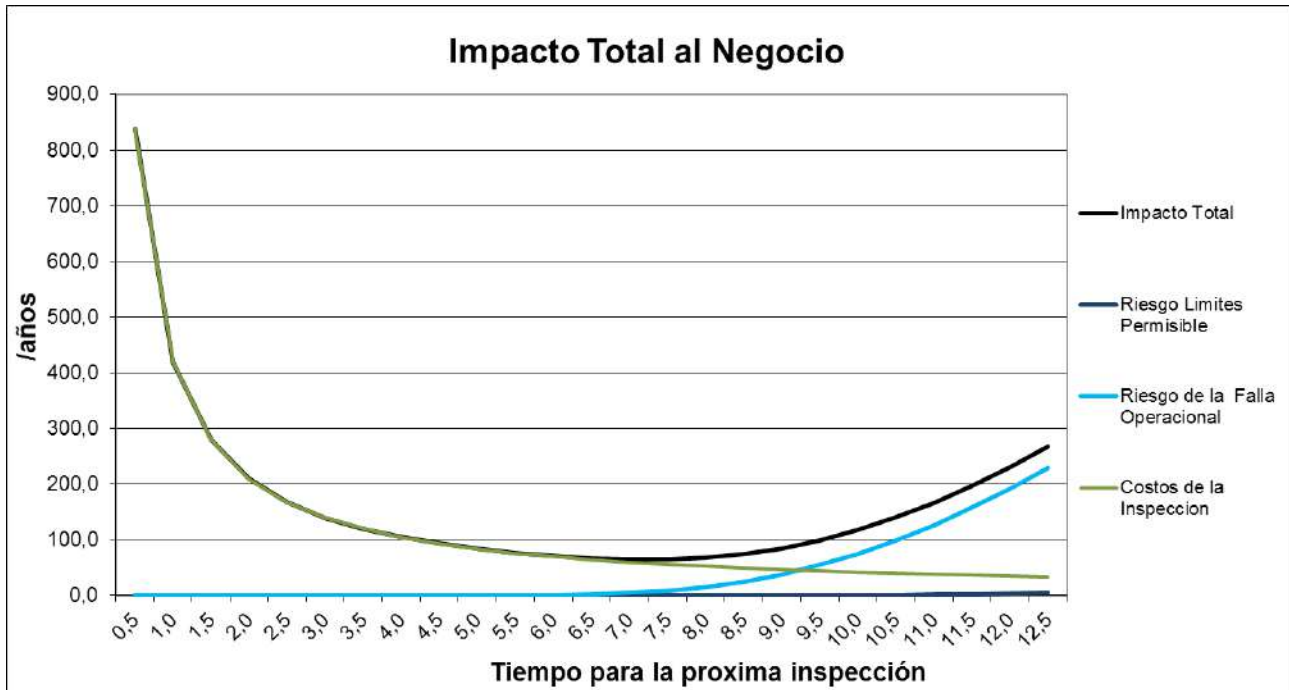
A continuación se muestra la tabla de los resultados indicando la frecuencia óptima para la próxima inspección. Estos resultados son obtenidos a través de la aplicación de un modelo matemático que modela el deterioro a diferentes frecuencias considerando costos, riesgos y desempeño.

Calcular Primer Intervalo:	0,5	Año(s)
Calcular cada:	0,5	Año(s)
Intervalo de insp. Max permitido	2	Año(s)
Probabilidad de falla Max aceptada:	0	/Año(s)
Intervalo Actual	2	Año(s)
Intervalo Seleccionado		Año(s)

Costos Expresados como (USD/Año)					
	Tiempo para la próxima inspección (Año(s))	Costos de la Inspección	Inspeccion Predictiva		Impacto Total al Negocio
			Costos del Riesgo Pasando Limite Permisible	Costos del Riesgo Falta Operacional	
	0,5	838	0,00	0,00	838,00
	1,0	419	0,00	0,00	419,00
	1,5	279	0,00	0,00	279,33
	2,0	210	0,00	0,00	209,50
	2,5	168	0,00	0,00	167,60
	3,0	140	0,00	0,00	139,67
	3,5	120	0,00	0,00	119,71
	4,0	105	0,00	0,00	104,75
	4,5	93	0,00	0,02	93,13
	5,0	84	0,00	0,09	83,89
	5,5	76	0,00	0,33	76,51
	6,0	70	0,00	0,94	70,77
	6,5	64	0,00	2,28	66,74
	7,0	60	0,00	4,82	64,68
	7,5	56	0,01	9,11	64,99
	8,0	52	0,03	15,75	68,15
	8,5	49	0,08	25,27	74,65
	9,0	47	0,19	38,13	84,87
	9,5	44	0,39	54,62	99,11
	10,0	42	0,72	74,91	117,53
	10,5	40	1,23	99,00	140,14
	11,0	38	1,96	126,77	166,82
	11,5	36	2,92	157,98	197,34
	12,0	35	4,14	192,31	231,36
	12,5	34	5,63	229,36	268,51

De acuerdo a este modelo la próxima inspección debe ser realizada en 7 años. No obstante, es recomendable el monitoreo cada cierto tiempo de las variables de deterioro para pronosticar el momento oportuno para la intervención del equipo. Para la resolución de este cálculo se modeló el costo de realizar la tarea de inspección a varias frecuencias y de la misma manera se calculó el riesgo de no hacer la tarea de inspección. Cabe destacar que los resultados obtenidos por la hoja de cálculo fueron validados y son muy

cercanos a los arrojados por un programa computacional comercial de amplia trayectoria mundial con aplicación en varios sectores industriales. La poca diferencia se debe a la exactitud o precisión utilizada en el modelo del programa comercial, la cual por razones de confidencialidad no es posible conocerla. La matemática utilizada en la hoja de cálculo dispone de los parámetros y ajustes necesarios, los cuales están definidos en las normas y bibliografías consultadas.



**Figura 6.** Gráfica de Resultados del Modelo Matemático. Fuente: AMT – Inspection. 2017

## 9.- Conclusiones

En resumen, no basta con diseñar un plan de mantenimiento (PERFECTO) considerando todos los modos de fallas que han ocurrido o los que pueden ocurrir, a través de las diferentes herramientas o metodologías que sirven de soporte para responder la pregunta qué HACER, sino que también se debe definir CUÁNDO hacer la acción de mantenimiento y/o inspección para soportar la toma de decisiones en la gestión de activos. (Fuenmayor, 2017). El estudio de la frecuencia óptima de inspección debe ser calibrado o revisado si el contexto operacional donde está instalado el activo cambia con el tiempo, al igual que el incremento del deterioro ya que esto puede afectar la confiabilidad, el desempeño entre otras variables, debido a la afectación del comportamiento del activo para cumplir con su(s) función(es). Tal como se mostró en las primeras páginas de este documento, la confiabilidad del activo se ve afectada a medida que el equipo

envejece, ya que su tasa de falla se incrementa, por lo que se recomienda adecuar los planes de inspección a la edad y condición del equipo, considerando los costos en el ciclo de vida para seleccionar las tareas que sean no solo técnicamente factibles sino económicamente rentables y presupuestariamente viables. (Fuenmayor, 2017)

Por otra parte, el cálculo de la frecuencia óptima de inspección o intervalo para la próxima inspección es un parámetro sumamente importante para el monitoreo del deterioro del activo, ya que se puede anticipar la falla, es decir, una vez conocido el punto de la falla potencial se puede establecer el tiempo máximo permitido antes de llegar a la falla funcional. En el caso de equipo de contención de energía como lo son los equipos estáticos es muy esencial definir el momento oportuno para la inspección debido a las consecuencias cuando se pierde la función primaria del equipo.

## 10.- Referencias

- [1] Edgar Fuenmayor. 'Calculando la Frecuencia Óptima de Mantenimiento o Reemplazo Preventivo'. *Revista Predictiva 21* N° 23. 2017. <http://www.predictiva21.com>
- [2] John D. Campbell and James V. Reyes – Picknell: 'Uptime', *Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Canada, CRC Press. 2016.
- [3] UNE – EN 16646 *Mantenimiento en la Gestión de los Activos Físicos*. 2015.
- [4] *Asset Management – An Anatomy, Version 3, United Kingdom, IAM*. 2015.
- [5] John Woodhouse.: 'Asset Management Decision-Making: The SALVO Process', *Strategic Assets: Life Cycle Value Optimization, United Kingdom, TWPL*. 2014.
- [6] ISO - 55000 *Asset Management — Overview, Principles and Terminology*, 2014.
- [7] Andrew K.S. Jardine and Albert H. C. Tsang, *Maintenance, Replacement, and Reliability (Theory and Applications), Second Edition*, CRC Press. 2014.
- [8] Ramesh Gulati, 'Maintenance and Reliability' *Best Practices, Second Edition*, Industrial Press, Inc. 2013.
- [9] John D. Campbell, Andrew K.S. Jardine and Joel McGlynn; "Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions", CRC Press. 2011.
- [10] Edgar Fuenmayor, José Durán y Luís Sojo: 'Decisión de Reemplazo o Reparación de un Equipo', 2011. <http://www.gestionpas55.com>
- [11] Macro Project EU 1488, 2008, <http://www.macroproject.org>
- [12] Medardo Yáñez, Hernando Gómez de la Vega, Genebelin Valbuena.: 'Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo', Venezuela, R2M. 2004.
- [13] SAE JA1012, *Una guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. 2002.
- [14] John Moubray.: 'Reliability Centered Maintenance', RCM II, *Second Edition*, Industrial Press, Inc. 1997.
- [15] John Woodhouse.: 'Managing Industrial Risk', *Getting value for money in your business*, London, Chapman & Hall. 1993.
- [16] Colin Labouchere, C.M.: 'Use of a Small Computer to Assist in Making Maintenance Decisions', *Proceedings of UK Maintenance Congress*, London 1982.

# PREDICTIVA21

SIGUENOS EN LINKEDIN

Únete a nuestros foros  
y comparte tus opiniones y artículos



Predictiva21

*Conectate!*



# Desafíos que enfrentan los Gerentes de Mantenimiento

Los gerentes de mantenimiento de las empresas enfrentan actualmente el reto de conocer los tiempos adecuados para lograr los lapsos ideales de funcionamiento, ahorrar costos y lograr que la gestión de activos sea realmente efectiva.

Chris Struve  
CEO Fractal

---

**E**l gerente de mantenimiento desempeña una actividad altamente compleja. Tanto la productividad como la generación de valor dentro de la organización, dependen en gran medida de una gestión de mantenimiento eficiente. Es por esto que la responsabilidad del gerente de mantenimiento es tan grande, como diversas son sus ocupaciones. A continuación enumeramos algunos de los desafíos que enfrenta en el día a día de su desempeño.

## 1. Previsión y predicción

Uno de los retos que enfrenta el gerente de mantenimiento moderno, consiste en incrementar la eficiencia operacional de la organización, reduciendo los tiempos de parada no programada, mediante la implementación de un modelo de gestión de mantenimiento que podría ser a la vez preventivo y predictivo.

Este tipo de mantenimiento, se plantea como objetivo garantizar la continuidad productiva de la organización, asegurando la disponibilidad y confiabilidad de sus equipos e instalaciones, disminuyendo al mínimo las reparaciones reactivas.

Para ello es necesario tener un amplio conocimiento de los equipos e instalaciones con los que se está trabajando y de las recomendaciones del fabricante, así como de las garantías, entorno operacional, manuales e instructivos. Todo esto le ayuda a saber, de antemano, cuáles son los tiempos precisos para la sustitución y recambio de piezas y partes, y cuáles son los lapsos ideales de mantenimiento que implican limpieza, lubricación, inspección, overhaul, etc. Con base a este conocimiento, el gerente de mantenimiento, deberá diseñar planes orientados, no a esperar que ocurran las fallas para solventarlas, sino a evitar que ocurran en primer lugar.

## 2. Manejo de contingencias

Aún en los casos en los que las organizaciones logran adoptar un enfoque preventivo y predictivo del mantenimiento,

**Con base a un conocimiento amplio de los equipos e instalaciones con los que está trabajando, así como las recomendaciones de los fabricantes, garantías, manuales e instructivos y los procesos de funcionamiento, el gerente de mantenimiento deberá diseñar planes orientados a evitar, en primer lugar, que las fallas se presenten en lugar de esperar a que aparezcan.**

el manejo de las contingencias siempre será un desafío a enfrentar para el gerente de mantenimiento. Por lo tanto, mantener un enfoque reactivo del mantenimiento seguirá siendo siempre necesario para cualquier empresa. Estos enfoques, lejos de ser exclusivos, se complementan mejorando la efectividad de la gestión de mantenimiento.

En tal sentido, los gerentes de mantenimiento deben contar con la capacidad de improvisación y la velocidad de respuesta necesaria, y al mismo tiempo, con la previsión de tener a mano los instrumentos, herramientas, materiales e insumos necesarios para solventar, lo más rápido posible, las averías y fallas que puedan presentarse de manera imprevista.

## 3. Control de costos

Otro de los desafíos que enfrentan los gerentes de mantenimiento, se presenta al momento de calcular el presupuesto de su departamento, donde el manejo de inventarios tiene mucho que ver. Es vital contar con todas las piezas, partes, repuestos y materiales necesarios para llevar a cabo las tareas de mantenimiento, sin que se extienda innecesariamente el tiempo de parada programada para mantenimiento rutinario, o para reparaciones por averías imprevistas.



“ En la coordinación para la gerencia de mantenimiento, el trabajo colaborativo es de vital importancia”

Sin embargo, es igualmente importante no comprar y almacenar estas unidades en exceso, pues con el tiempo llegan a convertirse en una pérdida de capital y de recursos para la organización.

Cuando se trata del cálculo del presupuesto, los gerentes de mantenimiento también deben considerar todos los tipos de costo, ya sean de tipo fijo, variable, directo o indirecto, y hacerse cargo de aspectos tales como la negociación de precios con los proveedores, o la consideración de invertir en nuevas herramientas tecnológicas capaces de generar valor.

#### 4. Coordinación de equipos de trabajo

La coordinación de las tareas de mantenimiento, requiere de habilidades interpersonales de liderazgo y planificación. Ello con la finalidad de integrar correctamente los grupos de trabajo, y de asignarlos a la ejecución de tareas acordes con sus habilidades, preparación y nivel de experiencia.

El conocimiento, la experiencia y la preparación varía de acuerdo al perfil técnico, por lo que el trabajo colaborativo resulta de vital importancia. Es importante que el gerente de mantenimiento ayude a facilitar las vías de comunicación y el trabajo integrado entre los diferentes integrantes de un equipo, entre los diferentes equipos de trabajo e, incluso, entre los diferentes departamentos que se ven involucrados o afectados por la gestión del departamento de mantenimiento.

Establecer un modelo de trabajo colaborativo, en el que se pueda compartir información en tiempo real sobre las tareas completadas, las averías, los procedimientos, las fechas de caducidad, etc., es uno de los desafíos esenciales de la gestión de mantenimiento moderna.

#### 5. Gestión efectiva del tiempo

La coordinación y monitoreo de los grupos de trabajo, la asignación de tareas, reuniones con vendedores y distribuidores, responder consultas, dudas y correos electrónicos, esquematizar planes de trabajo y mantenimiento, e incluso, reaccionar frente a toda clase de situaciones imprevistas, son solo algunas de las múltiples tareas con las que debe enfrentarse a diario cualquier gerente de mantenimiento.

La organización, priorización y ejecución de cada una de estas actividades, implican el manejo de grandes cantidades de información, el acceso inmediato a documentos, diagramas y fotos, y la habilidad de compartirlos con los diferentes integrantes del equipo de trabajo, facilitando la función de cada quien, y garantizando la calidad y efectividad del trabajo. Todo ello hace que el manejo eficiente del tiempo, se convierta en un reto cotidiano para el gerente de mantenimiento.

# ANÚNCIATE en nuestra página web

con un solo click 

**PREDICTIVA**<sup>21</sup>

Contáctanos: [contacto@predictiva21.com](mailto:contacto@predictiva21.com)

[www.predictiva21.com](http://www.predictiva21.com)



# El aprendizaje automático y su aplicación en la industria



**Precisión.** Las nuevas tecnologías permiten optimizar procesos y prevenir eventos con mayor exactitud.



**Irene González**

irene.gonzalez@predictiva21.com

La cuarta revolución o Industria 4.0 implica una transformación digital que involucra varios aspectos en relación con el uso de las tecnologías de la información en las empresas y su aplicación para la optimización de sus procesos: Iot o Internet de las cosas, sistemas ciberfísicos, computación en la nube y el aprendizaje automático o machine learning.

En el caso específico del mantenimiento predictivo, la web analyticslane.com señala: “La miniaturización y el abaratamiento de los sensores durante los últimos años ha permitido que estos proliferen para medir el estado de las máquinas, permitiendo obtener información valiosa sobre el estado de cada una de ellas. Haciendo que la gestión de las máquinas sea cada vez más asequible. Así, mediante la introducción de centenas o miles de punto de medida en las máquinas, se puede obtener una visión en tiempo real del estado de salud del conjunto. Estos conjuntos de datos se pueden utilizar posteriormente para entrenar algoritmos de aprendizaje automático con los que se pueden predecir la aparición de un funcionamiento incorrecto o fallos en los diferentes componentes individuales. El objetivo de esto es poder predecir, programar la reparación de las máquinas antes de que estas fallen de forma que el proceso productivo se vea afectado lo mínimo posible”.

## ¿QUÉ ES EL MACHINE LEARNING?

El aprendizaje automático o machine learning se centra en el desarrollo de programas informáticos que pueden cambiar al exponerlos a nuevos datos. Es una técnica de análisis de datos que enseña a las computadoras, es decir, se usan datos para detectar patrones en los datos y ajustar las acciones en consecuencia.

## Casos palpables

Recientemente, en el evento Machine Learning in Oil and Gas realizado en Houston, TX, se destacó cómo el aprendizaje automático o machine learning es responsable de una variedad de cambios en todas las industrias. En la industria del petróleo, el futuro está escrito en esta materia pues intervendrá para influir en áreas como el aumento de la fuerza laboral, mejorar la seguridad, mejorar la ejecución basada en datos y simplificando procesos complejos. Para muchas empresas inclusive puede ser un desafío la aplicación de herramientas que aprovechan el aprendizaje automático.

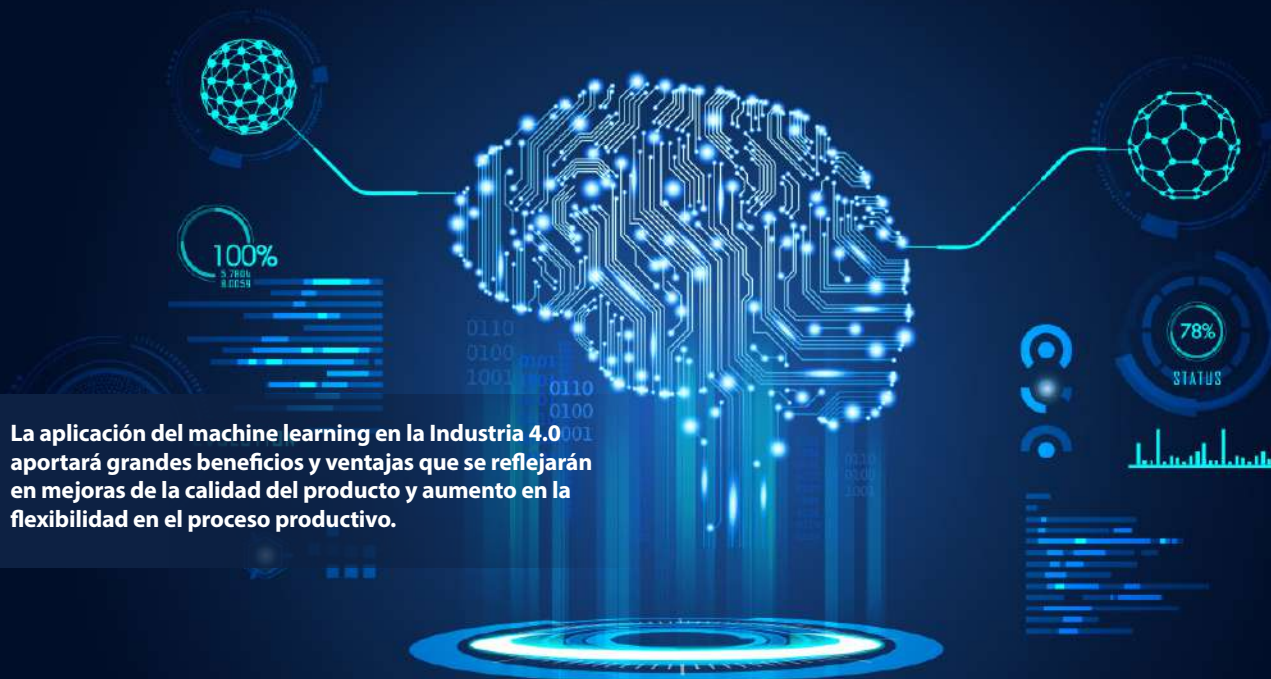
Expertos de Hess Corporation aseguran haber utilizado el aprendizaje automático con éxito en la reducción de la cantidad de tiempo dedicado a la limpieza de datos, unificación de las fuentes de datos para garantizar la información actualizada que conduzca a mejores conocimientos analíticos. Ejemplos como estos demuestran que el machine learning pueden mejorar la industria del petróleo y gas, pues brinda una gran oportunidad a las empresas a unificar sus datos para impulsar la eficiencia y permitir, en consecuencia, una mejor toma de decisiones.

## En la industria petrolera

De acuerdo con el portal blogs.nvidia.com, desde el modelado sísmico, una buena planificación para predecir las fallas mecánicas y optimizando las cadenas de suplementos, el aprendizaje automático puede desbloquear internamente la data oculta previamente y escondida como el petróleo bajo el subsuelo.

### Usos más comunes del machine learning:

- Seguridad de datos
- Seguridad personal
- Comercio financiero
- Cuidado de la salud
- Marketing personalizado
- Detección de fraudes
- Recomendaciones
- Búsqueda Online
- Procesamiento de lenguaje
- Autos inteligentes



**La aplicación del machine learning en la Industria 4.0 aportará grandes beneficios y ventajas que se reflejarán en mejoras de la calidad del producto y aumento en la flexibilidad en el proceso productivo.**

Con el análisis mediante GPU acelerados, los operadores de pozos pueden visualizar y analizar grandes volúmenes de producción y datos sensibles tales como la presión de bombeo, caudales y temperaturas. Esto puede darles una mejor visión de insumos más costosos al predecir cuál equipo puede fallar y cómo estas fallas podrían afectar sistemas más amplios. En conclusión, la incorporación y uso de algoritmos de aprendizajes automático y profundo, ayudará a las compañías petroleras a determinar la mejor forma para optimizar sus operaciones en la medida en que cambian las condiciones.

### **Algunas áreas en las que se podrá aplicar positivamente el machine learning:**

- Transformación del proceso de producción
- Vehículos y máquinas autónomas.
- Control de calidad.
- Mantenimiento predictivo.
- Predicción de la demanda.
- Chatbots.

### **Drones inteligentes para prevenir incidentes**

Un gran proveedor de soluciones industriales, Terra Drone, expone varios casos de éxito en la industria petrolera gracias

al uso de drones para la inspección y el monitoreo de los recursos en lugares de difícil acceso o peligrosos para los trabajadores, dando respuestas rápidas y preventivas ante cualquier evento.

“En la actualidad los avances en la tecnología, como análisis 3D, drones con aplicaciones industriales, IoT e inteligencia artificial; han permitido realizar el monitoreo de los recursos de una forma activa y ha habilitado a las compañías en establecer una línea base de comportamiento “normal” para los activos fundamentado en datos históricos, cuando ocurre alguna desviación de esa línea base, se genera una alarma que permite tomar decisiones y acciones oportunas”, refiere el portal World Trade Energy, destacando casos como una inspección 3D de una plataforma de perforación offshore en el mar del norte y la primera inspección no tripulada de un tanque en una embarcación offshore de la empresa Petrobras.





¿Y en América Latina?

Un estudio de everis y Endeavors en la que incluye a 240 empresas de Argentina, Brasil, Colombia, Perú, Chile y México señala que los desarrollos de IA están orientados principalmente a la técnica de machine learning. “Esta investigación arrojó que, en América Latina, 59 por ciento resuelve estos desafíos mediante métodos supervisados, mientras que un 19 por ciento se concentra en métodos no supervisados”, reporta en el trabajo publicado en endeavor.cl.

“En materia tecnológica, las empresas que desarrollan IA en la región muestran un alto enfoque de 59 por ciento en uso de aprendizaje supervisado basado en minería de datos con machine learning, técnicas útiles y relevantes para capitalizar datos para la toma de decisiones. Lo anterior, se refleja en 65 por ciento de los modelos de negocio de las empresas, principalmente orientados en predicción, diagnóstico, clasificación y tendencias en Business Intelligence & Analytics”.



Foto de Hess Corporation

Toda la industria, grande, mediana o pequeña se verá afectada por la transformación y la propia demanda exigirá que el costo de la tecnología se haga más accesible. Los métodos de machine learning serán cada vez más

importantes en cuanto a cantidad de datos se refiere. Mientras más datos, mejor y más preciso el análisis. Nos espera un mundo lleno de tecnología para optimizar y crecer.

**Referencias**

<https://searchdatacenter.techtarget.com>  
<https://blogs.nvidia.com/blog/2018/01/29/baker-hughes-ge-nvidia-ai/>  
<https://www.tamr.com/blog/how-machine-learning-is-changing-the-oil-and-gas-industry/>  
<http://www.endeavor.cl/wp-content/uploads/El-impacto-de-la-IA-en-el-emprendimiento-en-Am%C3%A9rica-Latina-everis-y-Endeavor.pdf>



# CURSOS CORTOS SEMANALES

SIN COSTO

COPIMAN y AMGA te invitan a ver sus **CURSOS CORTOS** gratuitos.  
Con la finalidad de compartir conocimiento y propiciar el intercambio de experiencias entre los profesionales del mantenimiento y la confiabilidad.



**OCTUBRE 04**

Una Introducción al análisis dinámico de sistemas mediante ODS, OMA y AEF - **Dennis Espinoza**  
- BOLIVIA



**OCTUBRE 18**

Confiabilidad Humana con Enfoque Integrado - **Julio Carvajal**  
- COSTA RICA



**OCTUBRE 11**

¿Por qué es necesario realizar un Análisis de Peligros en la Industria?  
- **Glenda Gutiérrez** - COLOMBIA



**OCTUBRE 25**

Lubricación de transmisiones por Cadena: Eficiencia Energética y Confiabilidad - **Pablo Gondolo** - ARGENTINA



**¡COMPARTE TU CONOCIMIENTO!**  
propicia el intercambio de experiencias

## ¿CÓMO FUNCIONA?

Elige un tema en específico y desarrolla tu presentación. ¡LISTO!  
Ahora envíalo a : [gtrujillo@noria.mx](mailto:gtrujillo@noria.mx) para aprobación y acuerdo de fecha.

## ¿CÚAL ES LA MODALIDAD?

Imparte un curso EN VIVO de 30 minutos por medio de la plataforma ZOOM donde estarás conectado con los profesionales del mantenimiento y la confiabilidad impartiendo un tema de tu especialidad.

SUSCRÍBETE A NUESTRO CANAL DE  
YOUTUBE USANDO EL SIGUIENTE CÓDIGO



You  
Tube

<http://bit.ly/cursos-copiman-amga>



**TODOS LOS VIERNES**  
**10:00 A.M. UTC-5**



**CURSO EN VIVO TODOS LOS VIERNES 10 A.M. (UTC -5 )**  
**CURSOS GRABADOS DISPONIBLES EN YOUTUBE**





# La otra visión de la confiabilidad operacional

Aplicabilidad de la metodología y jerarquización de activos por análisis de criticidad

Jean farfán

ljmfl7788@gmail.com

**E**n virtud de hacer extensiva La Otra Visión de la Confiabilidad Operacional desde una perspectiva simplista y de fácil comprensión al lector, le presento una manera práctica y sencilla la metodología de Confiabilidad Operacional «Críticidad» aplicada en la industria Petrolera Nacional en Venezuela.

En base a las experiencias vividas en los Campos Petroleros de Venezuela y en la cotidianidad en las áreas operacionales, me permito compartir en estas cortas líneas para describir La otra visión de ver el Mundo de la Confiabilidad Operacional y su aplicación tradicional, cuya finalidad radica en mejorar la rentabilidad de los procesos productivos y entendiendo que cada día, se dedican enormes esfuerzos destinados a visualizar, identificar, analizar e implantar mejores prácticas operacionales para la solución de problemas y toma de decisiones efectivas y acertadas, que involucren un alto impacto en las áreas operativas de una empresa.

En líneas generales, el objetivo fundamental de las empresas, está en fortalecer sus metas del negocio y obtener niveles máximos de eficiencia, eficacia y confiabilidad operacional, que satisfagan y orienten los niveles de productividad de un negocio. Lo que traerán consigo una serie de desafíos los cuales deben ser afrontados en corto, mediano y largo plazo, según sea el caso.

De este modo, la actividad empresarial se acompaña esencialmente de la incertidumbre que predetermina la necesidad de elegir una de las diferentes alternativas para la ejecución de un diagnóstico certero. Considerando una gama de metodologías de Confiabilidad Operacional, en la cual logre determinar la condición actual de un sistema, muy distinta a la manera tradicional que se conoce de realizar un diagnóstico.

Palabras Clave: Confiabilidad operacional, criticidad, frecuencia de falla, índice de probabilidad de falla, taxonomía, contexto operacional.

Abreviaturas. AC: Análisis de criticidad. ENT: Equipo natural de trabajo. IPF: Índice de probabilidad de falla. MBND:

### **¿POR QUÉ ES IMPORTANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CRITICIDAD PARA REALIZAR DIAGNÓSTICOS?**

**Sencillo, nos permite establecer prioridades de instalaciones, sistemas y equipos, cuyo fin es facilitar la toma de decisiones efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea necesario mejorar basada en la realidad actual y garantizar los niveles de confiabilidad operacional de los activos.**

Miles de barriles día de petróleo. MMPCND: Millones de pies cúbicos normal día de gas. MBA: Miles de barriles de agua. %AyS: Porcentaje de Agua y Sólidos. SPC: Sistema de protección catódica. TPFS: Tiempo promedio fuera de servicio.

La finalidad de todo estudio es ir de lo simple a lo complejo, para ello se presenta una serie de definiciones básicas a conocer cuando se dispongan a realizar un Análisis De Criticidad.

**Un Análisis de Criticidad (AC): Es una metodología que establece la jerarquía de activos, considerando variables de frecuencia (FF) e índice de probabilidad de falla (IPF) y sus consecuencias, con la finalidad de direccionar esfuerzo y recursos en áreas a mejorar que impacten la confiabilidad operacional. (Jean Farfán)**

Activo: Es un elemento tangible o intangible capitalizable de naturaleza permanente, que cumple una función en un proceso productivo y está sujeto a acciones de mantenimiento [1].

Análisis Funcional del Activo: Es la identificación de la relación o interconexión entre los diferentes procesos, sistemas y subsistemas de una instalación [1].

Criticidad: Es un método de fácil manejo y comprensión, cuya virtud es proveer donde mejorar el activo y jerarquizarlos. Es representado a través de una Matriz 5x5, que denota el valor cuantitativo a mejorar, al combinar la frecuencia de ocurrencia o índice de probabilidad de fallas con las consecuencias que tienen. [1].

La fórmula utilizada es:



**Figura 1.** Ecuación de Criticidad Fuente: Petróleos de Venezuela Norma MM-01-01-02 (2011)

**Consecuencias: Resultado de un evento. Pueden existir una o más consecuencias de un evento, las cuales sean expresadas cualitativa o cuantitativamente [1].**

**Consecuencias = ((Nivel de producción. x tiempo promedio fuera de servicio (TPFS) x Impacto de producción.) / 24 horas + Costo de reparación + Impacto en Seguridad. + Impacto Ambiental).**

Ciclo de vida de un Activo: Es todo lo que ocurre con el activo desde la idea con la cual se lo crea o incorpora a un proyecto, hasta su disposición final. Este ciclo de vida tiene asociado el "Costo de Ciclo de Vida", el cual es la sumatoria de todos los costos asignables al activo (directos e indirectos, variables y fijos). [2]



**Figura 2.** Ciclo de Vida de un Activo Fuente: <https://cmc-latam.com/gestion-activos-ciclo-vida> (2019)

Confiabilidad Operacional: Es la filosofía de trabajo orientada en una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la productividad; además lleva implícita la capacidad de

una instalación (procesos, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional. [1].

Contexto Operacional: Es el conjunto de circunstancias que condicionan la operación de un equipo o sistema, están definidas como: localidad, ambiente, fluido de servicio, parámetros de operación, lineamientos ambientales, de seguridad y producción, calidad y disponibilidad de los insumos requeridos, configuración de trabajo, flexibilidad operacional, redundancia, alarmas, monitoreo de primera línea y otros. [1].

Costo - Beneficio: Es una herramienta financiera que mide la relación entre los costos y beneficios asociados a un proyecto de inversión con el fin de evaluar su rentabilidad, entendiéndose por proyecto de inversión no solo como la creación de un nuevo negocio, sino también, como inversiones que se pueden hacer en un negocio en marcha tales como el desarrollo de nuevo producto o la adquisición de nueva maquinaria. [3]

Custodio de Instalación: Es el ente encargado de velar por el funcionamiento de los activos dentro de los parámetros operacionales establecidos, con el fin de lograr el producto bajo las especificaciones requeridas. [1].

Datos del Equipo: Son los parámetros técnicos, operativos y ambientales que caracterizan el diseño y la utilización de una unidad de equipo. [1].

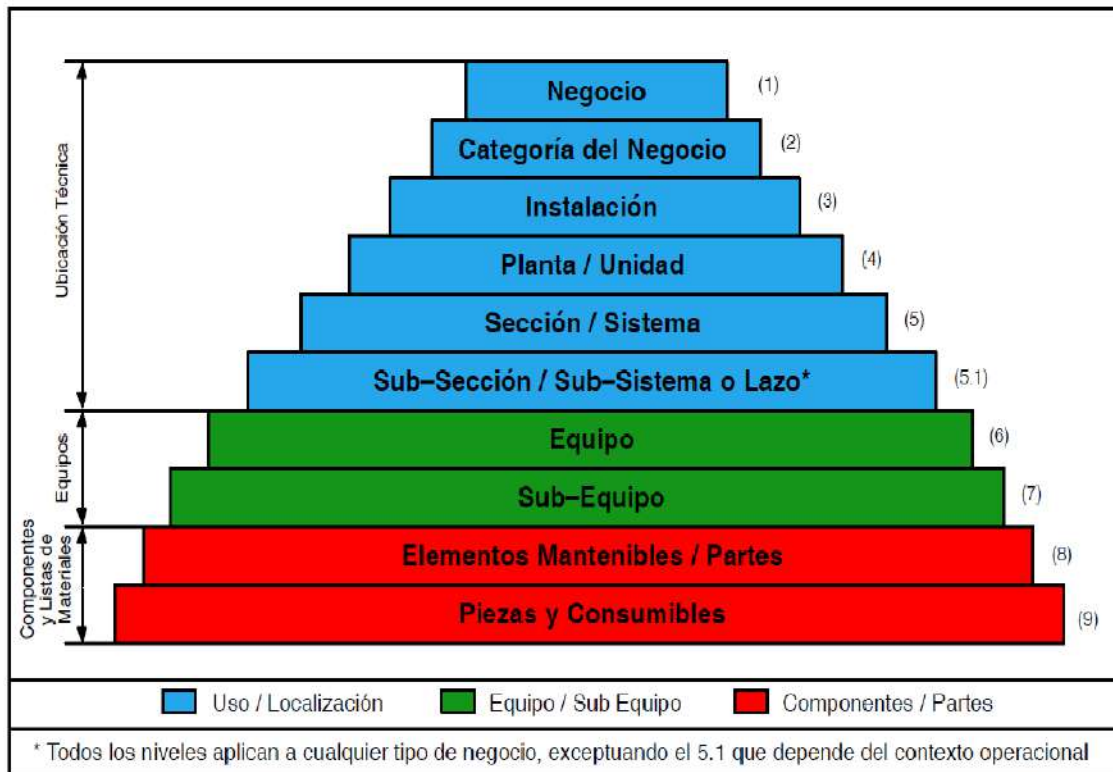
Equipo: Es un elemento de producción dentro de un arreglo lógico funcional que cumple con los siguientes criterios:

- Está sujeto a planes de mantenimiento.
- No es componente, parte o pieza (ejemplos: sello mecánico, manómetros, haz de tubo, tarjeta electrónica, entre otros).
- El valor de reemplazo es mayor que el costo de mantenimiento.
- Es trazable en el tiempo.
- Está sujeto a un control de gastos ocasionados por la aplicación de mantenimiento correctivo, preventivo, proyectos de mantenimiento y paradas de planta. [1].

Equipo Natural de Trabajo (ENT): Es un equipo multidisciplinario constituido por especialistas o actores de diferentes disciplinas que tienen como objetivo guiar la implementación de estrategias de mantenimiento y confiabilidad, la sincronización de actividades, el establecimiento de planes integrales de acción y la optimización de los costos de producción y mantenimiento en la organización. Entre los actores o especialistas que pueden conformar el ENT se encuentran: custodios de instalaciones, planificador, programador, ejecutor, ente técnico, entre otros. [1].



**Estructura Taxonómica: Es una representación por niveles de los activos de una organización en un arreglo lógico y funcional en el SGCM, a través del cual se realizan todos los documentos técnicos y operativos que permiten controlar y asegurar el registro de todas las operaciones de mantenimiento. [4]**



**Figura 3.** Pirámide de Niveles Taxonómicos Fuente: Petróleos de Venezuela Norma MM-01-01-07 (2012)

**Falla:** Es la pérdida de capacidad para realizar su función según se requiera. [5]

**Función:** Es la capacidad de un elemento o activo de brindar un determinado servicio según las condiciones de trabajo, respetando su diseño. [1].

**Índice de Probabilidad de Falla (IPF):** Es un Índice que se calcula en función de las actividades de inspección y mantenimiento que se llevan a cabo en cada uno de los sistemas, considerando factores que están referidos a condiciones operacionales, corrosión, integridad mecánica, desempeño, control y protección, entre otras. [6].

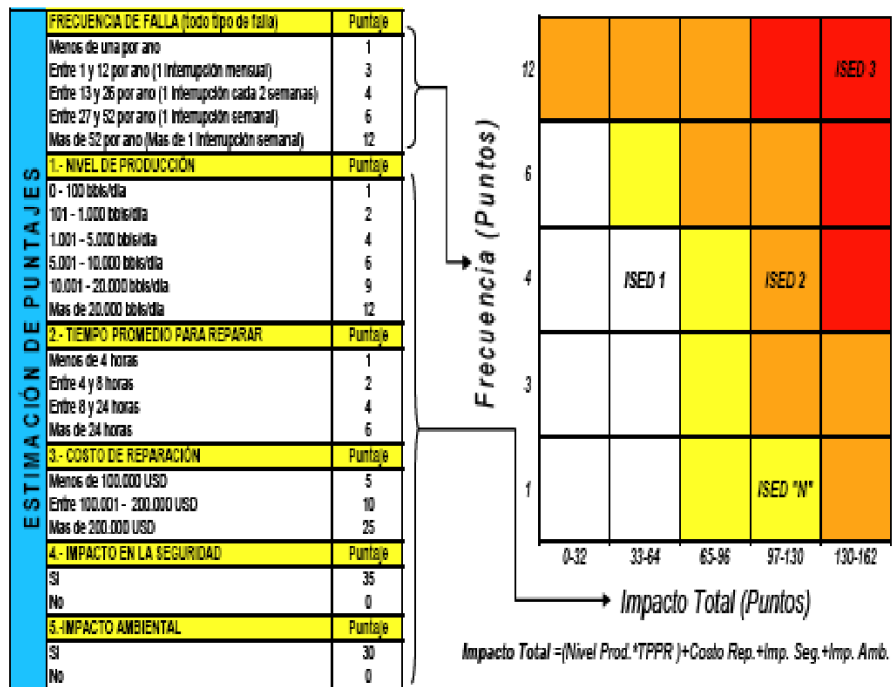
**Instalación:** Es el tercer nivel de la estructura taxonómica que hace referencia al macroproceso productivo, localización o disposición geográfica. [1]

**Modo de Falla:** Es cualquier evento que genera una falla funcional- [7]

**Mantenimiento:** Es una combinación de todas las acciones técnicas y administrativas, que pretenden retener o restaurar un activo en un estado en el que pueda ejecutar una(s) función(es) requerida(s). [1]

**Metodología de los Puntos:** La estructura de criticidad que provee la llamada “metodología de los puntos” tiene su origen en el movimiento de mejora de la confiabilidad de los procesos productivos que se inició en la industria petrolera del Mar del Norte en la década del 90 [manual de criticidad de PDVSA - CIED] y hoy es ampliamente utilizada en la industria petrolera; por supuesto, con múltiples adecuaciones y modificaciones. La base fundamental de este enfoque es el establecimiento de un sistema de puntos para valorar la criticidad; y de una matriz cuyos rangos de frecuencia y consecuencia se expresan en “puntos”.

Se recomienda la participación de “equipos naturales de trabajo” en la valoración de la criticidad para minimizar el sesgo y la subjetividad. [16]



**Figura 4.** Metodología de Criticidad de Puntos. Fuente: R2M. S.A Reliability and Risk Management , Análisis De Criticidad Integral De Activos (2007)

Planta / Unidad: Es el cuarto nivel de la estructura taxonómica que hace referencia a un proceso productivo que integra la instalación. [1]

Sección / Sistema: Es el quinto nivel de la estructura taxonómica que hace referencia a las subdivisiones que componen una planta o unidad. [1]

Sub-Sección/Sub-Sistema o Lazo: Es el nivel 5.1 de la estructura taxonómica, definido en la Norma Técnica PDVSA MM--01--01--07, que se establece para ser utilizado según la complejidad de la organización y el contexto operacional que requiera un nivel de detalle adicional a los cinco niveles previos. Ejemplo: sub--sistema de ventilación, sub-sistema de bombeo, sub--sistema de alimentación, lazo de control, entre otros. [1]

Tiempo promedio entre fallas (TPEF): Es el tiempo promedio entre una falla y otra, éste incluye el tiempo fuera de servicio. [1]

Técnicas de análisis de riesgo: Existen diferentes técnicas para dimensionar el riesgo, tales como: Cualitativas, Semi-Cuantitativas y Cuantitativas.

### Premisas básicas a considerar en un Estudio de Criticidad

- Utilizar el Contexto Operacional para identificar el proceso y su funcionamiento.
- Evaluar el entorno en donde se encuentra el activo.
- Contar con la Estructura Taxonómica de los Activos en un Sistema de Gestión y Control.
- Planos, otros.

### Métodos para el Cálculo de Criticidad

Para el cálculo de criticidad son utilizados comúnmente las siguientes:

- Método de los Puntos.
- Método de Tony Cilliberti.
- NORSOK Z-008
- Estándar Military

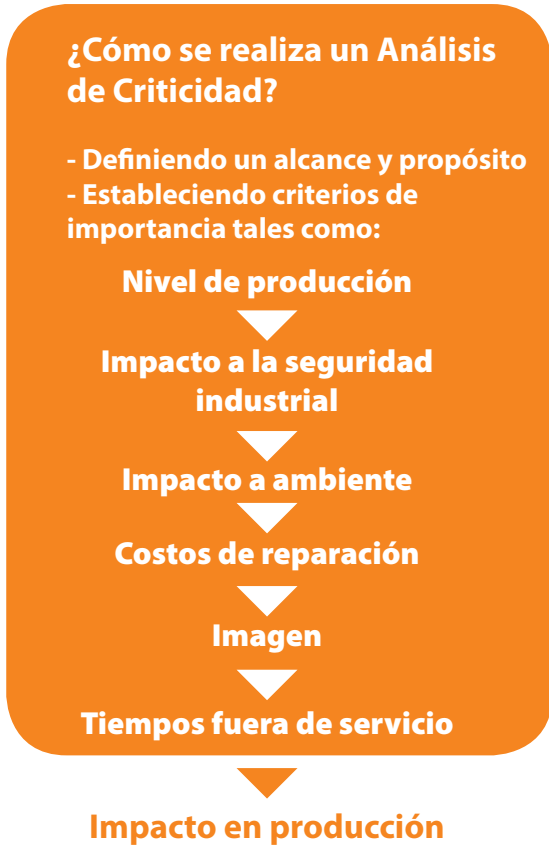


Figura 5. Criterios Básicos de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

**¿Cuáles son los pasos sugeridos en un Análisis de Criticidad?**

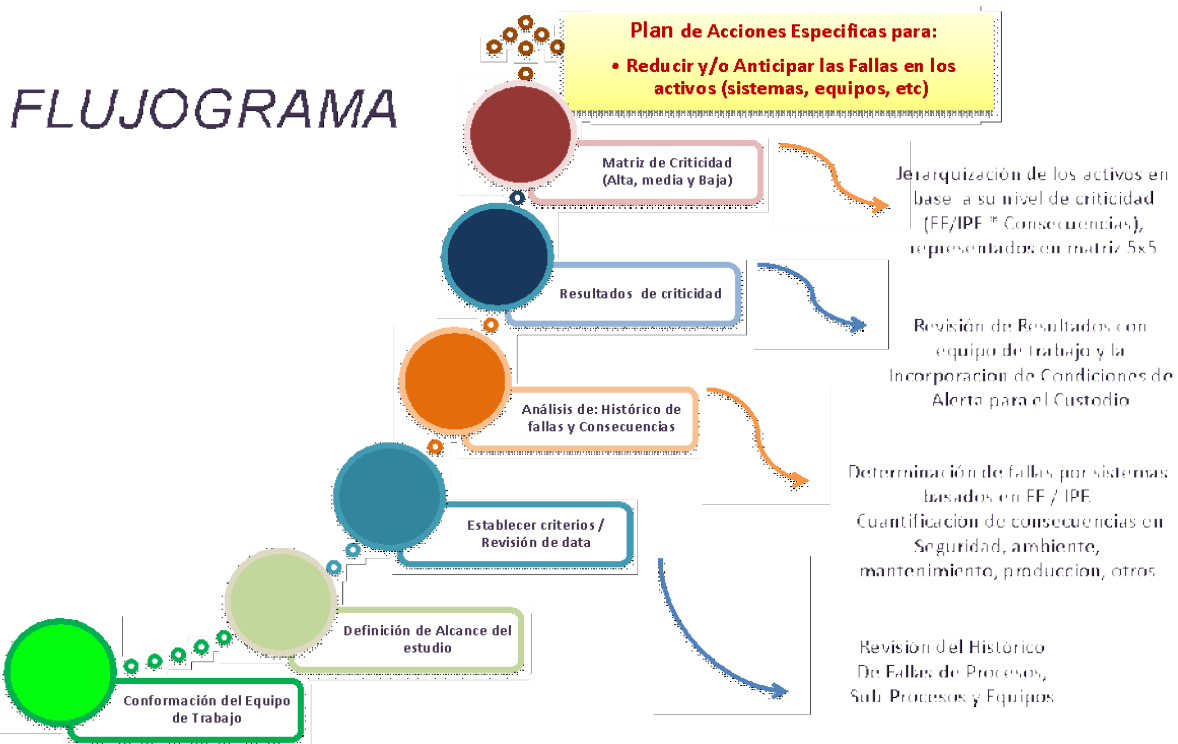


Figura 6. Flujoograma de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

## ¿Cuándo hacer un Análisis de Criticidad?

- Fijar prioridades en sistemas complejos
- Administrar recursos escasos
- Necesidad de crear valor
- Cambios en instalaciones, sistemas y equipos
- Buscar determinar el impacto en el negocio

## ¿En dónde se aplica un Análisis de Criticidad?

En cualquier conjunto de: Procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes, que requieran ser jerarquizados en función de su impacto al negocio.

## ¿Quiénes participan en los AC?

Entre los actores o especialistas que pueden conformar el Equipo Natural de Trabajo (ENT), se encuentran: custodios de instalaciones, planificador, programador, ejecutor, ente técnico, proyectos, finanzas, mantenedores, ingenieros de proceso, confiabilidad, entre otros.

## ¿Qué resultados se obtienen de un Análisis de Criticidad?

Una representación de la frecuencia de falla ó IPF x consecuencias (Matriz de 5X5), en donde se resalta con colores el nivel de criticidad para cada proceso, plantas, sistemas, equipos y/o componentes, a fin de poder atacarlos en base a la jerarquización resultante del estudio.

*“La criticidad es un indicador del nivel de riesgo”.*



Figura 7. Matriz de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

## ¿Cuáles son los beneficios de un Análisis de Criticidad?

- Proveer soluciones durante el ciclo de vida útil de los activos
- Mejorar los niveles de confiabilidad
- Reducir la tasa de falla de los activos
- Incrementar la eficiencia en los procesos productivos.

## ¿Qué hacer después de obtener los resultados de la Criticidad?

Seguimiento y control de planes de acción:  
Después de emitir el plan de acción asociado a la matriz de criticidad, se debe crear y establecer el seguimiento y control por parte del ingeniero de confiabilidad operacional, a fin de garantizar la ejecución de las acciones

y el cumplimiento de las recomendaciones consecuentes del estudio.

Los objetivos del seguimiento y control a considerar en la criticidad:

-Asegurar la continuidad en el tiempo de aplicación de planes de acción resultantes de la implementación de la metodología de análisis de criticidad.

-Monitorear los cambios o mejoras (Reingeniería, Rediseños, otros) que pueden derivarse de la aplicación de las acciones generadas como resultados del análisis AC, para determinar si se requiere un nuevo estudio.

-Mantener actualizado el Sistema de Gestión y Control de Recomendaciones, en base a las acciones ejecutadas y del avance de las tareas que se encuentran en progreso.

**VALOR AGREGADO**

En palabras simples “hacer algo más para ver resultados exitosos” en la aplicación de los estudios de criticidad.

**Generación de Valor de los Estudios de Criticidad**



**Figura 8.** Valor agregado. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

**Caso 1**  
**Método de los puntos y frecuencia de falla (FF)**

Se explicará el método de los puntos y la frecuencia de falla (FF), para determinar la criticidad en un conjunto de instalaciones petroleras que procesan fluido multifásico (crudo, gas y agua) en Venezuela, dichos sistemas de manera general se pueden mencionar como el conjunto de activos que realizan las funciones básicas para operar y mantener con los mayores estándares de eficiencia de empresas de primer nivel.

Dichos equipos son: (Pozos, múltiples de recolección, oleoductos, gasoductos, acueductos, separadores, depuradores, enfriadores, despojadores de líquidos, fosas API, torre de absorción, intercambiador de calor, rehervidor bombas, unidades de medición fiscal, filtros, deshidratadores, tanques de estabilización, almacenamiento, compresores, motores, turbinas, generadores eléctricos, mechurrios, que realizan el proceso macro de extraer, manejar, disponer,

almacenar y transportar el fluido (petróleo, gas y agua) extraído de los yacimientos para su uso en el mercado interno como su venta en el exterior.



**EL CAMPO PETROLERO ESTUDIADO INICIÓ SU PRODUCCIÓN EN EL AÑO 1930.**

Plan de producción del año en estudio es de 187 mil barriles normales día de petróleo (MBND) con una gravedad 23 °API. Con 31 Yacimientos Activos, los métodos de Producción son: BES / BM /BCP /GL/FN y actualmente están 7 Campos activos.

El Rango de producción / Pozo está en el rango de: 50 – 2300 BPD, los compromisos de producción del año son: Producción del año: 187 MBD, Inyección de gas: 450 MMPCG e Inyección de Agua: 410 MBA.



Una vez conocido el entorno del sistema a estudiar, definido el objetivo, alcance y conformación del ENT, se procede a describir de manera clara y sencilla el contexto operacional del activo sujeto al estudio de la siguiente manera:

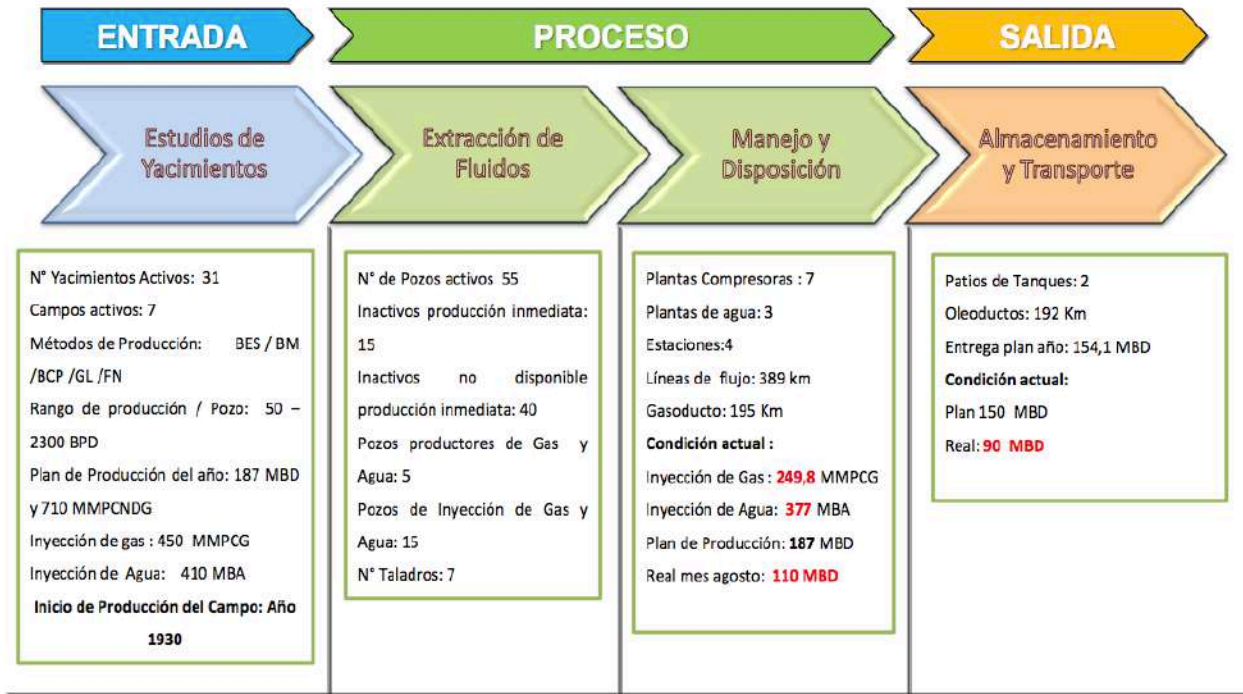


Figura 9. EPS del Contexto Operacional de las instalaciones. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

**Es importante resaltar que los estudios de criticidad (AC) tienen su particularidad en cuanto a la definición de variables, premisas y consideraciones según sea el Contexto Operacional del sistema a evaluar.**

Para el caso planteado el ENT estableció las siguientes premisas del estudio

- Frecuencia de Falla (FF)
- Tiempo promedio fuera de servicio
- Nivel de producción
- Impacto en producción
- Costo de reparación
- Impacto en la seguridad personal
- Impacto Ambiental

Más adelante se detalla el alcance de cada una de las variables consideradas para este estudio.

-Frecuencia de Falla (FF): Es la cantidad de eventos (Fallos) suscitados en el activo con afectación al sistema productivo.

Nota: Los valores de FF y TPFS fueron tomados de los indicadores de desempeño correspondientes al año de estudio, y para aquellas instalaciones que no se les llevan el registro histórico, la data fue generada del ENT y revisión del libro de operadores y mantenedores.

-Tiempo promedio fuera de servicio (TPFS): Se consideró el tiempo para reparar una falla recurrente y se mide la efectividad en restituir el activo a condiciones de operabilidad una vez que la unidad queda fuera de servicio (F/S).

-Nivel de producción: Está relacionada a la capacidad de producción diaria del activo sujeto al estudio, a condiciones de operación existentes.

-Impacto en producción: Es el porcentaje de producción que se ve afectada cuando ocurren fallas en el activo sujeto al estudio.

-Costo de reparación: Son los costos incurridos (labor, materiales y transporte) para reparar las fallas del activo sujeto al estudio y así restituir su función. Los costos se calculan a una paridad cambiaria fijada por el Banco Central de Venezuela (BCV). Este costo lo suministra el equipo de Ingeniería de Costos.

-Impacto en la seguridad personal: representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen lesiones, heridas o fatalidades del personal descritas en las leyes y normas nacionales e internacionales vigentes.

-Impacto Ambiental: representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasione la violación de cualquier regulación ambiental.



Figura 10. Criterios Básicos de Criticidad Fuente: Elaborada por el autor (2019)

Una vez definidos todos los elementos (FF y Consecuencias) procedemos al cálculo de la criticidad, utilizando la plantilla diseñada para el sistema en estudio, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia de Falla (FF)} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Criticidad} = \text{Índice de Probabilidad de Falla (IPF)} \times \text{Consecuencia}$$

Figura 11. Ecuación de Criticidad. Fuente: Petróleos de Venezuela Norma MM-01-01-02 (2011)



Ya realizados los pasos previos descritos en el flujo grama mostrado en la figura N°5, el estudio se presenta preliminarmente ante el ENT para revisar y validar los resultados de la criticidad.

A continuación, se muestran los resultados por proceso (Crudo, Gas y Agua) de la aplicación de criticidad utilizando la frecuencia de falla (FF), representados en una matriz 5 x 5.

<i>Plantas de Manejo de Crudo</i>						
Frecuencia de Fallas (veces/año)	> 53	Planta N° 4				
	40-52					
	27-39					
	14 - 26	Planta N°2				
	< 13		Planta N°1			Planta N°3
		0-750	751 - 1500	1501 - 2250	2251 -3000	> 3000
		Consecuencia				

**Figura 12.** Resultados de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

<i>Plantas de Manejo de Gas</i>						
Frecuencia de Fallas (veces/año)	> 53	Planta N° 5 Planta N°6	Planta N° 13			Planta N°11
	40-52					
	27-39	Planta N° 8				
	14 - 26					
	< 13	Planta N°9	Planta N°7			
		0-750	751 - 1500	1501 - 2250	2251 -3000	> 3000
		Consecuencia				

**Figura 13.** Resultados de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)



Frecuencia de Fallas (veces/año)	Categorías de Criticidad				
	0-750	751 - 1500	1501 - 2250	2251-3000	> 3000
> 53	Verde	Verde	Amarillo	Rojo	Rojo
40-52	Verde	Verde	Amarillo	Rojo	Rojo
27-39	Amarillo	Verde	Amarillo	Rojo	Rojo
14 - 26	Amarillo	Verde	Amarillo	Verde	Rojo
< 13	Verde	Verde	Verde	Amarillo	Rojo

Figura 14. Resultados de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

Ya finalizado este paso (Matriz 5x5), el ENT genera un listado de alertas y acciones con la finalidad de facilitar la toma de decisiones efectivas, direccionar el esfuerzo y los recursos en áreas a mejorar en el corto, mediano y largo plazo.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestra el detalle más relevante que generó la condición de criticidad de las instalaciones estudiadas (Ver figura 15).

**Principales problemas:** Deshidratación, enfriamiento, tratamiento anticorrosivo y control de corrosión.

**Plantas de Manejo de Crudo**

**Plantas de Manejo de Gas**

**Principales problemas:** Alto número de fallas en moto-compresores (Lubricación, Compresión, monitoreo y control). Desfase en la realización de los mantenimientos niveles III y IV. Procura de repuestos menores y consumibles y problemas en válvulas de control de inyección de gas a pozos.

**Principales problemas:** Alto número de fallas en motores, turbinas (desplazamiento axial) y bombas (Sellos). Agua fuera de especificaciones, Falta de inyección de productos químicos en los sistemas de filtración.

**Plantas de Manejo de Agua**

Figura 15. Análisis de Resultados de Criticidad. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

## CONCLUSIONES

En base a la volumetría de instalaciones estudiadas (14), se tiene que 4 activos están en alta criticidad, 4 en media y 6 en baja criticidad.

- En alta criticidad dos (2) plantas de manejo de agua, una (1) crudo y una (1) de gas.
- Media criticidad tres (3) plantas de gas y una (1) de crudo.
- En baja criticidad tres (3) plantas de gas, dos (2) de crudo y una (1) de agua.
- Con la determinación de la criticidad, se están generando las alertas a los niveles de autoridad correspondientes para la toma de decisiones oportunas que puedan afectar los objetivos de producción, el presupuesto, la seguridad, salud, ambiente y a la comunidad, ya que permitirá mejorar los procesos.

## PLAN DE ACCIÓN

CORTO PLAZO	MEDIANO PLAZA	LARGO PLAZO
1. Establecer las estrategias para Plantas en criticidad alta. 2. Garantizar los recursos para el cumplimiento de las acciones de mejora planteadas 3. Seguimiento y Control continuo	1. Retomar el plan de inspección preventivo establecido y controlar factores de impacto como: condición y tipo de revestimiento, aislamiento eléctrico 2. Acelerar los procesos de contratación de acuerdo al contexto operacional y la criticidad de las instalaciones	3. Impulsar los procesos de procura de materiales y consumibles para la ejecución de los mantenimientos preventivos establecidos en los planes de cuidado del activo. 4. Adquisición de productos químicos para el proceso de producción (demulsificantes, antiespumantes, anticorrosivos, otros)
No mayor a cuatro meses	Entre cuatro a ocho meses	No mayor a un año

Figura 16. Plan de Acción. Fuente: Elaborada por el autor (2019)

## 6. Referencias

- [1] *Petróleos de Venezuela (2010) Norma MM-01-01-01 Definiciones de Mantenimiento y Confiabilidad.*
- [2] *Gestión de Activos y Ciclo de Vida Por: Equipo de Investigación y Desarrollo de Ellmann, Sueiro y Asociados*  
<https://cmc-latam.com/gestion-activos-ciclo>.
- [3] *Costo-beneficio Por Arturo R. 18 Abr 2012* <https://www.crecenegocios.com/el-analisis-costo-beneficio/>
- [4]. *Petróleos de Venezuela (2011) Norma PDVSA MM-01-01-07 Taxonomía de Activos para Sistema de Control y Gestión de Mantenimiento)*
- [5]. *Estándar internacional ISO 14224:2016.*
- [6]. *Petróleos de Venezuela (2011) Norma PDVSA MM-02-01-01 Jerarquización de Activos por Análisis de Criticidad).*
- [7] *SAE JA-1011 año 2011*
- [8] *Petróleos de Venezuela 2013 Análisis de Mejorabilidad Instalaciones de Manejo de Crudo, Gas y Agua Distrito Furrrial- IM-IT-ICO-FU-001-13.*
- [9] *Petróleos de Venezuela 2012 Jerarquización Por Condición Referencial De Riesgo De Las Líneas De Transferencia Del Campo Furrrial IM-IT-ICO-DF-007-12.*
- [10] *El Análisis de Criticidad, una Metodología para mejorar la Confiabilidad Operacional.* <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-analisis-de-criticidad-una-metodologia-para-mejorar-la-confiabilidad-ope/>
- [11] *Análisis de criticidad de plataformas Activo Integral Cantarell PEMEX Exploración y Producción Desarrollo e Implementación de un Modelo de Variables de Estado de Equipos y Estructuras Jorge Enrique Martínez Frías a, Andrés Eduardo Rivas b, Richard J. Matthews c Departamento de Integridad Mecánica y Confiabilidad PIMS Of London LTD.* (<https://docplayer.es/14054076-Analisis-de-criticidad-de-plataformas.html>)
- [12] *Análisis de criticidad parte 1 y 2.* <http://a3consultraining.com/analisis-de-criticidad-de-activos-parte-1/>.
- [13] *PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN TUBERÍAS por Ing. José Gregorio Rendón* [https://ICONSA\\_Website\Articulos\\_Tecnicos\Articulos\St17v2...2/13/2006](https://ICONSA_Website\Articulos_Tecnicos\Articulos\St17v2...2/13/2006)
- [15] *Análisis de criticidad personalizados Revista de Ingeniería Mecánica, vol. 12, núm. 3, septiembre-diciembre, 2009, pp. 1-12 Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría Cuba.*
- [16] *Análisis De Criticidad Integral De Activos (2007) R2M. S.A Reliability and Risk Managemen por: Edwin Gutiérrez, Miguel Agüero, Ivanaska Calixto.*

# PREDICTIVA21

AHORA EN FACEBOOK

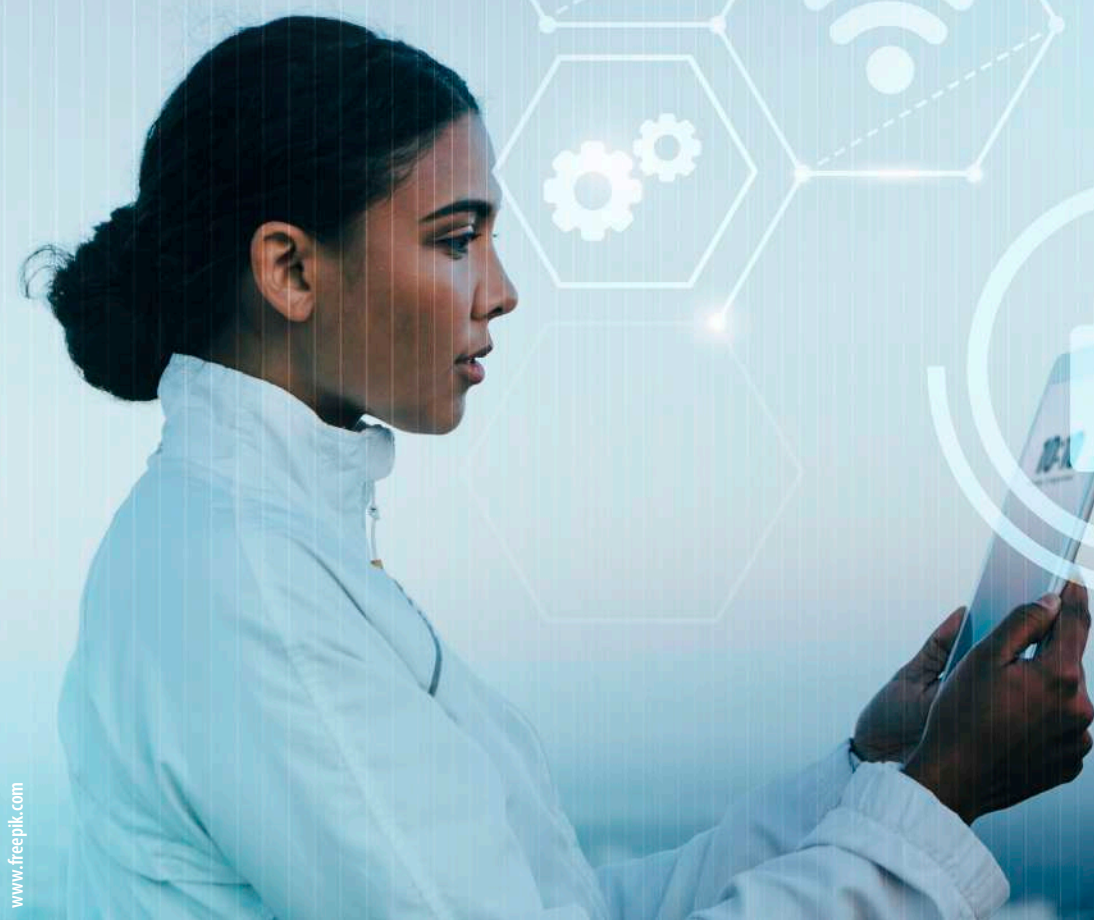


Predictiva21

*Me Gusta!*

# La industria y los protocolos de comunicación

**Futuro.** La comunicación ha estado presente desde que el hombre es hombre como una necesidad para crecer y desarrollarse. En el siglo XXI las empresas se suman a la tendencia que les aporta la posibilidad de optimizar sus operaciones.



Irene González  
 irene.gonzalez@predictiva21.com

“Vivimos en un momento excepcional de la historia tecnológica, gracias a la conectividad, prácticamente cualquier máquina con un mínimo de sofisticación emite datos que se encuentran en bruto, pero, a través de un proceso, se convierten en un insumo básico para la toma de decisiones”. El impacto de la inteligencia artificial en el emprendimiento, everis/endeavor.

Con el avance de la tecnología, la comunicación en el área de la industria debe poseer unas características particulares que permitan responder a las necesidades en tiempo real. Los protocolos se aprovechan de las ventajas funcionales y de seguridad para ofrecer mejores capacidades de transferencia de información en los sistemas de control.

### Protocolos de comunicación industriales.

Los protocolos de comunicación nos ayudan a establecer la comunicación entre los diferentes dispositivos ya sean para el fin de automatizar, de interactuar, de controlar, etc.

\*Ethernet/IP clasifica los nodos de acuerdo a los tipos de dispositivos preestablecidos, con actuaciones específicas. Ofrece un sistema integrado completo, enterizo, desde la planta industrial hasta la red central de la empresa, utilizando los protocolos de transporte (TCP), Internet (IP) y las tecnologías de acceso y señalización de medios que se encuentran en las tarjetas de interfaz de Ethernet.

\*DeviceNet. Es un sistema de cableados avanzados que fue diseñado para cambiar los cables discretos que son conectado a un controlador programable como son los sensores y actuadores. Este protocolo proporciona un sistema de cable único, que su uso es rápido, fácil conectar y de operar, creado para los dispositivos más simples.

\*Creado por Modicon, Modbus es una estructura de mensajería que se usa para establecer una comunicación entre cliente y servidor en los dispositivos. Los más usados actualmente: Modbus TCP/IP y RTU.

\*Profinet. Está basado en Ethernet Industrial y una de sus principales características es que es Ethernet en tiempo real.

**PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN**  
**Es un sistema de reglas que permite que dos o más entidades de un sistema de comunicación se comuniquen entre ellas para transmitir información por medio de cualquier tipo de variación de una magnitud física.**



Protocolo de comunicación industrial  
 Conjunto de reglas que permiten las interferencias e intercambios de datos entre varios dispositivos que forman una red.

\*Profibus. Posee una interfaz que permite una amplia aplicación en procesos, aplicación y automatización predial.

\*Serial Attached SCSI (SAS). Es una tecnología de transferencias de datos hacia dispositivos de almacenamiento (disco duro, unidades de CDRM, etc.), es el sucesor del protocolo SCSI, su velocidad aumenta y permite la conexión y desconexión de forma rápida. SAS cuenta a su vez con tres tipos de protocolos de comunicación: SSP, STP y SPM.

\*Ethercat. Es un protocolo de código abierto para informática y tiene un alto rendimiento que pretende usar protocolos Ethernet en el ambiente Industrial y es uno de los protocolos más rápidos en la actualidad. Los medios de EtherCAT encajan bien para los ambientes industriales o de control puesto que puede ser accionado con o sin interruptores.

BACnet. Define los servicios utilizados para la comunicación de los dispositivos de automatización de los edificios y los sistemas de control. BACnet se diseñó para admitir varias capas físicas y de enlace diferentes:

PTP (Punto a punto), MS/TP (master slave/taken passing), Archnet (un estándar de bus token), LonTalk.

Teodoro García Egea, Doctor Ingeniero, tecnólogo y político español, en su artículo, ¿Qué tecnologías se esconden detrás de la Industria 4.0?, afirma: "El internet de las cosas permite que el ser humano esté centrado en tomar decisiones en base a la información que la tecnología recopila de su entorno. El internet de las cosas coloca a cada uno donde mejor puede hacerlo. Utilizando sensores de bajo consumo energético y amplio rango, la tecnología IoT se encarga de recoger variables, hacer mediciones, recopilar datos que un ser humano sería incapaz de obtener. El IoT no sustituye el papel de la persona, pero sí exige su especialización en el procesado y tratamiento de la información recabada".

**"Si estás conectado, estás en riesgo".**

"Las fábricas del futuro están basadas en la hiperconectividad, en las comunicaciones M2M, en la capacidad de trabajo distribuido y en la integración de múltiples plataformas sobre las que trabajan personas

#### LOS PROTOCOLOS MÁS USADOS ACTUALMENTE

- Ethernet/IP
- Profinet
- Ethernet Powerlink
- DeviceNet
- Ethercat
- CC-Link
- Modbus
- Canopen





y objetos conjuntamente. La fábrica del futuro implica que grandes parcelas de la empresa estén conectadas no sólo en local, sino también al exterior. Esto genera unos riesgos de seguridad importantes que han de ser gestionados adecuadamente. El crecimiento de la industria 4.0 debe ir aparejado a un aumento de la inversión en ciberseguridad.

Fallar en este punto, supone poner en riesgo la supervivencia de toda la fábrica. La ciberseguridad en la Industria 4.0 no sólo tiene que ver con el espionaje industrial. El avance de la tecnología abre la puerta a

nuevos ataques que no tienen que ver con el robo de información, sino con tomar el control de todos aquellos elementos de la fábrica que se encuentren conectados. Pedir un rescate cifrando información valiosa, bloquear los elementos clave de una cadena de montaje, etc. El hacker y escritor Kevin Mitnik, avisó a aquellos que no se toman en serio estas cuestiones. En su libro "el arte de la intrusión" previene a los descuidados: "Cuando alguien piensa que nadie tendrá tiempo para encontrar una vulnerabilidad, hay un joven en Dinamarca que ya está intentando hacerlo" (¿Qué tecnologías se esconden detrás de la Industria 4.0?, retina.el país.com)

## Referencias

<https://vestertraining.com/tendencias-ciberseguridad-industrial-2019/>

<http://www.endeavor.cl/wp-content/uploads/El-impacto-de-la-IA-en-el-emprendimiento-en-Am%C3%A9rica-Latina-everis-y-Endeavor.pdf>

<https://www.logicbus.com.mx/blog/protocolos-de-comunicacion-industriales/>

[https://retina.elpais.com/retina/2017/10/09/tendencias/1507530622\\_383656.html](https://retina.elpais.com/retina/2017/10/09/tendencias/1507530622_383656.html)

# Aplicación de un Análisis RAM en un Sistema de Bombeo de Agua Cruda

Caso Estudio

**Prevención.** El uso de esta técnica contribuye a aumentar los niveles de confiabilidad.





Geovanny Solórzano

Ing. Esp. Confiabilidad de Sistemas Industriales  
solorzanog.1973@gmail.com

## Resumen

El Análisis de la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (Análisis RAM, por sus siglas en inglés Reliability, Availability, Maintainability) es una técnica asociada al “Área de Diagnóstico” de la Ingeniería de la Confiabilidad, y puede implementarse en instalaciones industriales en la fase proyecto o en la fase operación. En este trabajo técnico se presenta la aplicación de esta metodología, partiendo de la necesidad de pronosticar el desempeño de un Sistema de Bombeo de Agua Cruda, en un horizonte de 5 años. Para ello se tomó en consideración el no cumplimiento de las metas establecidas como requisitos de desempeño; entre ellas el tiempo promedio para fallar TPEF a 2 años, la Disponibilidad Operacional en 98,5%, el registro de 28 fallas en un lapso de 5,83 años, lo que representó una tasa de falla de 4,8 Fallas/Año; las condiciones de baja carga y paradas no programadas que generaron pérdidas económicas en el orden de los 256 M\$/D. Lo anterior, permitió identificar la situación actual de la sección, y el desarrollo del pronóstico de la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, la identificación de malos actores, la estimación de la eficacia global y el riesgo probabilístico y la presentación de acciones dirigidas a disminuir las fallas.

*Descriptor o Palabras Claves: RAM, Requisitos, Desempeño, Escenarios, Modos de Fallas, Riesgo, Eficacia Global del Sistema y Equipos Malos Actores.*

## 1. Introducción

En la “Fase Operación” de una instalación industrial, es donde se le da el arranque al sistema productivo, y es puesto en servicio para lograr su estabilización operacional en función de las expectativas de producción, en conformidad con los estándares establecidos. Los equipos de producción, una vez en operación estable y en contacto con el producto o servicio, tienen como primer objetivo mínimo retornar la “Inversión Inicial” asociada a la “Fase Proyecto” creando así valor económico para la organización.

Las industrias típicamente aplican las técnicas de confiabilidad solo en las instalaciones en condición operativa

### Abreviaciones y Términos

**DBD** Diagrama de Bloque de Disponibilidad

**DFP** Diagrama de Flujo de Procesos

**GPM** Galones por Minuto

**M\$/D** Miles de dólares día

**MM\$/A** Millones de dólares año

**MMGPA** Millones de Galones por Año

**NTU** Unidades Nefelométricas de Turbidez

**OEE** Overall Equipment Effectiveness / Eficiencia General de los Equipos

**PI&D** Piping and Instrumentation Diagram / Diagrama de Tuberías e Instrumentación

**R(t)** Riesgo

**RAM** → Reliability, Availability and Maintainability Analysis / Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad

**TPF** Tiempo para la Falla

**TPR** Tiempo para Reparar

**TPEF** Tiempo promedio entre Fallas

**TPEEP** Tiempo Promedio entre Eventos de Paro

**TPPR** Tiempo promedio para reparar

**TPFS** Tiempo Promedio Fuera de Servicio

**$\lambda$**  Tasa de falla

(Confiabilidad en la Fase Operación), pero estas pueden utilizarse también en las etapas iniciales de un proyecto, donde las oportunidades para la reducción de costos es del 65%, de esta manera pueden ayudar a maximizar el valor del dinero invertido durante la fase proyecto (Confiabilidad desde el Diseño). Estos dos enfoques están fundamentados por áreas de conocimiento y una de éstas, es el “Área de Diagnóstico” implementada para identificar y jerarquizar las plantas, sistemas, subsistemas, equipos, subequipos y componentes críticos en el proceso productivo, de acuerdo al impacto en la seguridad, ambiente, producción, daños a terceros, imagen y rentabilidad de la empresa; por otro lado, se logran dimensionar las desviaciones y oportunidades de mejoras.

El Análisis RAM, es una metodología del Área de Diagnóstico que permite con base al registro de fallas y de reparaciones de los equipos de producción, planes de mantenimiento preventivos, configuración, flexibilidades y filosofía operacional y eventos externos; diagnosticar el estado actual de un sistema productivo y pronosticar su desempeño por medio de la disponibilidad, confiabilidad y el factor de servicio, este último observado como la disponibilidad correspondiente a la capacidad de producción en un tiempo determinado.

Adicionalmente los resultados de un Análisis RAM contribuyen en el diagnóstico de posibles problemas por pérdidas de producción por indisponibilidad del proceso productivo, el impacto en la disponibilidad del sistema debido a: las estrategias de mantenimiento de los equipos, las políticas de inventario de repuestos y las condiciones de los equipos en relación a las fallas presentadas y las reparaciones.

El Análisis RAM para el Sistema de Bombeo de Agua Cruda de una Planta de Tratamiento de Agua Potable presentado en este trabajo técnico, se enmarcó en dos direcciones, la primera señala el seguir "Operando bajo el esquema actual" y se le denominó "Escenario 1" y la otra dirección indica el "Operar con un nuevo esquema" y a esta se le llamó "Escenario 2". Ambos escenarios respondieron a las siguientes preguntas: ¿Cuál sería la Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad del Sistema de Bombeo? ¿Cuál sería el número de fallas esperadas? ¿Qué caudal de agua cruda produciría el Sistema de Bombeo? ¿Cuáles serán los equipos malos actores? ¿Cuál sería el Riesgo asociado? y ¿Cuáles acciones se identificarán para minimizar la ocurrencia de fallas?

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Instalación / Complejo

Es el macroproceso productivo, por ejemplo, una refinería de petróleo (ISO - 14224:2016).

### 2.2. Unidad / Planta

Integran a la instalación y están referidas al proceso productivo por procesamiento de corriente, entre ellas podemos mencionar los siguientes ejemplos: Planta de Producción en Tierra (pozos), Fraccionamiento GNL y Destilación Atmosférica (crudo) (ISO - 14224:2016).

### 2.3. Sistema / Sección

→ Representan las subdivisiones en una planta, por ejemplo: sistema de tratamiento de gas, gas combustible y desalación (ISO - 14224:2016).

→ Yáñez, Gómez, Semeco, Nucette y Medina (2007) mencionan que "es todo conjunto de procesos, sub-sistemas, equipos, componentes y recurso humano que interactuando en conjunto y delimitado como un volumen de control generan un producto".

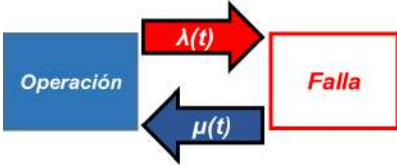


### 2.4. Equipo

→ Está constituido por un grupo o colección de partes ubicadas dentro de un paquete identificable, que cumple al menos una función relevante como ítem independiente.

Ejemplo: válvulas, motores, bombas, compresores, otros (Parra, 2015, p. 121)

En la Tabla 2.1, se muestra una clasificación de los equipos de producción sobre criterios del mantenimiento y la confiabilidad de estos.

**Tabla 2.1.** Clasificación de Equipos sobre aspectos de mantenimiento y confiabilidad. Fuente: Yáñez et al (2007) – Adaptado por el autor.

CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS		
EQUIPOS	EJEMPLOS	DEFINICIÓN
		<p>Su condición operativa puede ser restaurada después de una falla, por una acción de reparación diferente al remplazo total del mismo; y en su horizonte operativo puede ocurrir más de una falla.</p> <p>Sus registros de datos sobre tiempos operativos hasta la falla (Uptime) y los tiempos no operativos (Downtimes) tienen que caracterizarse probabilísticamente para la estimación de indicadores.</p> <p>Los indicadores de desempeño más importantes son Disponibilidad Inherente y Operacional D(t), Utilización, Tasa de Fallas <math>\lambda(t)</math>, el Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF/MTBF), el Tiempo Promedio Para la Falla (TPPF/MTTF) y el Tiempo Promedio Para Reparar (TPPR/MTTR).</p>
		<p>Su condición operativa no puede ser restaurada después de una falla; y su horizonte operativo termina con una "única falla" y debe ser reemplazado.</p> <p>Sus registros de datos sobre tiempos operativos hasta la falla (Uptime) tienen que caracterizarse probabilísticamente para la estimación de indicadores.</p> <p>El indicador de desempeño más importante es el Tiempo Promedio Para la Falla (TPPF/MTTF).</p>

## 2.5. Equipo Mal Actor

Es aquel donde las fallas se presentan con una frecuencia no esperada, o diferente a la típicamente conocida por experiencias previas, y de forma recurrente, además las causas y mecanismos de fallas son desconocidas (ISO - 14224:2016).

## 2.6. Desempeño

Es el resultado medible, y puede relacionarse con los equipos de producción en cuanto a su capacidad para lograr requisitos, y también puede relacionarse con las actividades de gestión, los procesos, productos (incluyendo servicios), sistemas u organizaciones (ISO - 55000:2014).

## 2.7. Requisitos

Es una necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria (ISO - 55000:2014).

## 2.8. Modo de falla

Un modo de falla podría definirse como cualquier evento que pueda provocar una falla del equipo (Moubray, 1997, p.53).

## 2.9. Contexto operacional

La definición de un contexto operacional típicamente incluye una descripción global breve de cómo se utilizará el equipo de producción, donde se utilizará, y los aspectos que gobiernan los criterios de desempeño global tales como lugar de operación, producción, rendimiento, redundancia, estándares de calidad y ambientales, seguridad, intensidad de las operaciones (turnos), trabajos durante la operación, tiempos de reparación, repuestos, suministro de materia prima y la demanda en el mercado (Moubray, 1997, p. 28-33).

## 2.10. Confiabilidad

Es la habilidad de un ítem para desempeñar una función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado" (ISO - 14224:2016).

## 2.11. Disponibilidad

Yáñez et al (2007), menciona que la disponibilidad es una figura de mérito o indicador que permite estimar el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. Se consideran TPEEP y los TPEF, para medir la probabilidad de que un equipo o sistema pueda realizar una función requerida en determinadas condiciones en un momento dado de tiempo, suponiendo que se proporcionen los recursos externos necesarios (ISO 144224:2016).

Para la estimación de la Disponibilidad Operacional (DO) y la inherente (DI) a continuación se señalan las ecuaciones 2.1 y 2.2:

$$DO = \frac{TPEEP}{TPEEP+TPFS} \quad (2.1)$$

Donde:

TPEEP: Tiempo Promedio entre Eventos de Paro.

TPFS: Tiempo Promedio Fuera de Servicio.

$$DI = \frac{TPEF}{TPEF+TPFS} \quad (2.2)$$

Donde:

TPEF: Tiempo Promedio entre Fallas.

TPFS: Tiempo Promedio Fuera de Servicio.

## 2.12. Mantenibilidad

Yáñez et al (2007 ), la define como la probabilidad de restaurar la condición operativa del equipo en un periodo de tiempo o tiempo misión.

## 2.13. Simulación de Monte Carlo

González, Hernández y Gordillo (2009) mencionan que el "método de Monte Carlo es una técnica que involucra el

“ En el riesgo coexiste la posibilidad de que un evento se haga realidad o se satisfaga ”



uso de números aleatorios y probabilidad para resolver problemas complejos, ya que el sistema productivo es muestreado en un número de configuraciones aleatorias y los datos pueden ser usados para describirlo como un todo”.

### 2.14. Raptor 7.0 - (Rapid Availability Prototyping for Testing Operational Readiness)

Es una herramienta que simula las operaciones de cualquier sistema, a través de algoritmos de simulación (fundamentados en el estado operativo y de reparación). Raptor es “acrónimo de Modelamiento Rápido de Disponibilidad para la Preparación de Pruebas de Actitud Operacional” (www.arinc.com).

### 2.15. Crystal Ball

Crystal Ball es un conjunto de programas basados en la aplicación de modelos predictivos, previsión, simulación y optimización de manera que permite identificar las variables críticas de un análisis que se esté realizando. El uso más común es para desarrollar la simulación de Monte Carlo en modelos financieros, físicos y matemáticos (www.oracle.com).

### 2.16. RARE

Es un programa informático utilizado como soporte para el desarrollo de estudios de ingeniería de confiabilidad y análisis de riesgos, RARE es el acrónimo de “Reliability Engineering And Risk Analysis”, (Yañez et al, 2007, p.35).

### 2.17. Riesgo

El riesgo es un término de naturaleza probabilística, que se define como “egresos o pérdidas probables a consecuencia de la posible ocurrencia de un evento no deseado o falla”. En este simple pero poderoso concepto coexiste la posibilidad de que un evento o aseveración se haga realidad o se satisfaga, con las consecuencias de que ello ocurra (Yañez et al, 2007, p.46). Matemáticamente el riesgo asociado a

una decisión o evento viene dado por la ecuación 2.3:

$$R(t) = p(t) \times c(t) \tag{2.3}$$

Donde:  
 R(t) = Riesgo  
 p(t) = Probabilidad de ocurrencia  
 c(t) = Consecuencias

### 2.18. Eficacia Global del Equipo (OEE)

La Guía Knar Sau (2008) lo define como “una medida del desempeño del equipo, sistema o proceso basada en la disponibilidad real, la eficiencia del desempeño y la calidad del producto o salida”. El OEE generalmente se expresa como se indica en la ecuación 2.4 en valores porcentuales.

$$OEE = Disponibilidad \times Desempeño \times Calidad \tag{2.4}$$

Donde valores:  
 < 65 % representa pérdidas en producción e incrementos de costos  
 Entre 65 y 75% valor aceptable y con tendencia a mejorar  
 ≥ 85% es considerado como valor Clase Mundial.

### 2.19. Acciones Predictivas

Acción para monitorear la condición de un equipo y predecir la necesidad de una acción preventiva o de una acción correctiva. La acción predictiva generalmente se menciona como “seguimiento de condición” o “seguimiento de desempeño” (ISO - 55000:2014).

### 2.20. Acciones Preventivas

Acción para eliminar la causa de una no conformidad potencial u otra situación potencial indeseable, entendiéndose por una no conformidad el incumplimiento

de un requisito. La acción preventiva generalmente se toma mientras el equipo está funcionalmente disponible y operable o antes de que comience la falla funcional, además incluye la reposición de consumibles cuando el consumo es un requisito funcional (ISO - 55000:2014).

### 2.21. Acciones Correctivas

Acción para eliminar la causa de una no conformidad y prevenir su recurrencia. En el caso de otros resultados indeseables, la acción es necesaria para minimizar o eliminar las causas y reducir el impacto o prevenir la recurrencia. Tales acciones caen fuera del concepto de acción correctiva en el sentido de esta definición (ISO - 55000:2014).

En la tabla 2.2, se encuentran algunas definiciones asociadas con los modelos probabilísticos y las ecuaciones para la estimación de la Confiabilidad y de la Mantenibilidad.

### 2.22. Diagramas de Bloques de Disponibilidad (DBD)

Yañez et al (2007) dice que es “un método para modelar la forma en que los equipos, componentes y las fallas de los subsistemas se combinan para causar una falla del sistema de producción”. Para su construcción se debe realizar la revisión detallada de los PI&D, diagramas funcionales y diagramas de proceso. Es de extrema importancia que la construcción de este modelo se haga desde el punto de vista de confiabilidad y no desde el punto de vista de proceso, error este que se comete con mucha frecuencia.

**Tabla 2.2.** Definiciones y ecuaciones para estimaciones de indicadores asociados a las distribuciones probabilísticas.  
Fuente: Yañez et al (2007) y Ferrera (2019).

VARIABLES DISCRETAS		VARIABLES CONTINUAS		ANÁLISIS DE DATOS		
Es una variable aleatoria que sólo puede tomar valores enteros, es decir, un número finito de valores contables. Las variables discretas se ajustan a las distribuciones probabilísticas: Binomial, Hipergonométrica y de Poisson.		Es una variable aleatoria que teóricamente puede tomar todos los valores de un intervalo dado (enteros, decimales), es decir, un número infinito de valores. Los modelos de distribuciones probabilísticas para las variables aleatorias continuas son: distribución Normal, Lognormal, Exponencial y de Weibull.		Es el principal paso para poder determinar las funciones probabilísticas, los datos estadísticos en la mayoría de los casos requieren un manejo y una revisión previa, debido a que tienden a ser escasos, poco confiables o inexactos, por lo que la recopilación de información es sumamente crítica.		
Distribución	Función de Densidad f(t)	Función de Densidad F(t)	Confiabilidad C (t)	Tasa de Fallas h(t)	Tiempo Promedio para Fallar TPPF	Parámetro
Weibull	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	$C(t) = e^{-\left[\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]}$	$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	$TPPF = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$	$\beta =$ Parámetro de forma $\eta =$ Parámetro de escala
Exponencial	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$C(t) = e^{-\lambda t}$	$h(t) = \lambda$	$TPPF = \frac{1}{\lambda}$	$\lambda =$ tasa de falla
Normal	$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2}$	$F(t) = \int f(t) dt$	$C(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{1 - C(t)}$	$TPPF = \mu$	$\mu =$ Media $\sigma =$ Desviación estándar
Log-Normal	$f(t) = \frac{1}{\sigma' \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{\ln(t) - \mu'}{\sigma'}\right]^2}$	$F(t) = \int f(t) dt$	$C(t) = 1 - F(t)$	$h(t) = \frac{f(t)}{1 - C(t)}$	$TPPF = e\left[\mu' + \frac{1}{2}\sigma'^2\right]$	$\mu' =$ Media de $\ln(t)$ $\sigma' =$ Desviación estándar de $\ln(t)$

Función de Distribución	Expresión Matemática	Dominio	Parámetro
Exponencial	$1 - e^{-t/\eta}$	$t \geq 0$	$\eta =$ Parámetro de escala  $\beta =$ Parámetro de forma  $\gamma =$ Parámetro de posición
Normal	$\theta[t - \eta]/\beta$	$-\infty < t < +\infty$	
Log-Normal	$\phi\left[\frac{\ln(t - \gamma) - \eta}{\beta}\right]$	$t \geq \gamma; \gamma \geq 0$	
Weibull	$1 - e^{-\left[\frac{(t - \gamma)}{(n - \gamma)}\right]^\beta}$	$t \geq \gamma; \gamma \geq 0$	

En la tabla 2.3, se presentan las configuraciones típicas de los equipos de producción en los sistemas de una planta, para la elaboración de los DBD.

### 2.22. Análisis RAM

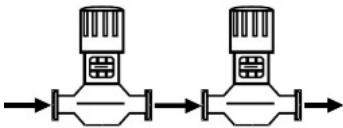
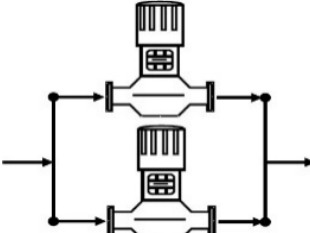
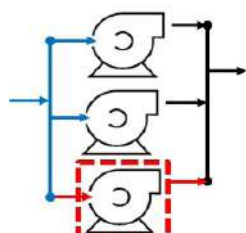
Metodología que permite pronosticar el comportamiento de un sistema productivo en un periodo determinado de tiempo a través del diagnóstico de su estado actual. Además, permite definir cuantitativamente:

- La disponibilidad y confiabilidad del sistema.
- Las pérdidas de producción por indisponibilidad del proceso productivo.

El impacto en la disponibilidad del sistema debido a:

- La política de aprovisionamiento de partes y repuestos.
- La política de mantenimiento.
- La logística e Impacto por redundancia.



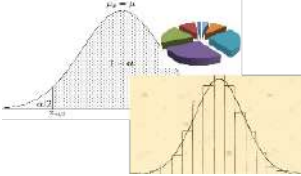

**Tabla 2.3.** Configuración de Sistemas para la elaboración de los DBD. Fuente: Yáñez et al (2007) – Adatado por el autor.

DIAGRAMAS DE BLOQUES DE DISPONIBILIDAD		
TIPO DE SISTEMA	EJEMPLO DE ARREGLO	DEFINICIÓN
<b>En serie</b>		<p>Son sistemas conformados por múltiples elementos de los cuales deben operar todos para que el sistema cumpla con su función.</p> <p>→ Ecuación de estimación de la Confiabilidad:</p> $C_{Sist. (t)} = C_1(t) \times C_2(t) \times \dots \times C_N(t)$ <p>→ Ecuación de estimación de la Probabilidad de Falla:</p> $F_{Sist. (t)} = 1 - [C_1(t) \times C_2(t) \times \dots \times C_N(t)]$
<b>En Paralelo</b>		<p>Son sistemas conformados por múltiples elementos de los cuales debe operar al menos uno para que el sistema cumpla con su función.</p> <p>→ Ecuación de estimación de la Confiabilidad:</p> $C_{Sist. (t)} = 1 - F_{Sist. (t)}$ <p>→ Ecuación de estimación de la Probabilidad de Falla:</p> $F_{Sist. (t)} = F_1(t) \times F_2(t) \times \dots \times F_N(t)$
<b>"K" de "N"</b>		<p>Son "sistemas en paralelo donde se requieren "K" de "N" componentes para cubrir el requerimiento establecido".</p> <p>→ Ecuación de estimación de la Confiabilidad:</p> $C_{Sist. (t)} = \sum_{r=K}^N \binom{N}{r} [C(t)]^r [1 - C(t)]^{N-r}$ <p>→ Ecuación de estimación de la Probabilidad de Falla:</p> $F_{Sist. (t)} = 1 - C_{Sist. (t)}$

La aplicación de un análisis RAM permite determinar los equipos de producción que tienen mayor influencia en los indicadores de disponibilidad y confiabilidad en un sistema productivo.

En la tabla 2.4, se puede observar el proceso para desarrollar un análisis RAM.

Tabla 2.4. Proceso para desarrollar un análisis RAM. Fuente: Yáñez et al (2007) – Adaptado por el autor.

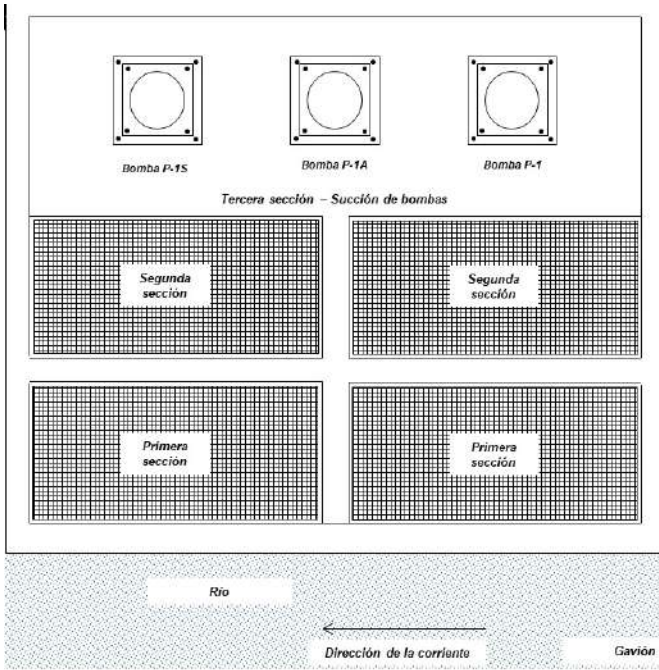
PROCESOS PARA DESARROLLAR UN ESTUDIO RAM		
PROCESO	ACCIONES	PRODUCTOS
<p><b>Captura</b></p>  <p><b>Información Previa</b></p>	<p>Recopilar y Revisar: Reportes Operacionales, de Inspecciones Técnicas, Avisos y Órdenes de Mantenimiento, Historial de Fallas y Reparaciones propios, información genérica (Oreda, Parloc, otros) de fallas y reparaciones y opinión de expertos.</p>	<p>Datos sobre desempeño, tiempos de operación, Fallas, componentes fallados, modos de fallas, costos, planes de mantenimiento preventivo, paradas no programadas y tiempo de reparación.</p>
<p><b>Diagnóstico</b></p>  <p><b>Datos Actualizados</b></p>	<p>Verificar el desempeño del Sistema de producción, identificar equipos Malos Actores, estimar los TPF, TPR, tasa de fallas, TPPF (aplicar teorema de Bayes de ser necesario - Evidencia Propia + Genérica), TPPR, Disponibilidad Operacional e Inherente, producción y costos de manera determinística. Elaborar el DBD mediante DFP y PI&amp;D y establecer los escenarios de evaluación.</p>	<p>Información consolidada de la Situación Actual del Sistema en estudio, diseño de DBD y el establecimiento de premisas para el análisis a través de simulaciones.</p>
<p><b>Tratamiento Estadístico</b></p>  <p><b>Caracterización probabilística y simulaciones</b></p>	<p>En este proceso las acciones están sujetas al uso de programas informáticos como RARE, Crystal Ball y RAPTOR. Inicialmente con el uso de RARE y Crystal Ball se realizaron las pruebas de ajuste de bondad con los datos de los TPF y TPR, para establecer las distribuciones probabilísticas y los parámetros de estas.</p> <p>A través de Raptor se realizarán las simulaciones para pronosticar el comportamiento del sistema productivo, en el tiempo establecido.</p>	<p>Reporte de los valores mínimos, esperados y máximos de disponibilidad, del factor de servicio, confiabilidad, la mantenibilidad, listado de equipos malos actores, número de fallas y el perfil estocástico.</p>
<p><b>Resultados</b></p>  <p><b>Pronóstico según los escenarios planteados</b></p>	<p>Organizar la información, graficarla y analizarla en función de determinar las diferencias con respecto a las premisas establecidas, plantear otros escenarios si fuese necesario y generar las posibles acciones que permitan cumplir con los requerimientos de desempeño preestablecidos para el sistema de producción.</p> <p>Estimar el Riesgo y el OEE Probabilístico.</p>	<p>Gráficos del comportamiento de los indicadores pronosticados bajo los escenarios establecidos. Presentación del Riesgo y el OEE Probabilístico, y de las propuestas para mejorar el desempeño futuro del sistema de producción.</p>

### 3. Caso Estudio

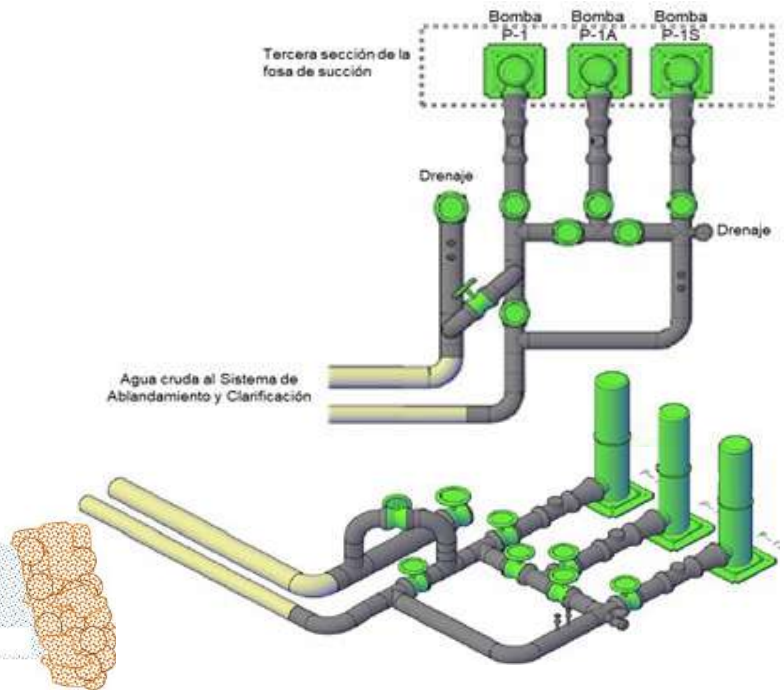
El sistema de bombeo de agua cruda capta este fluido de una fuente hídrica para su potabilización en la planta de tratamiento de agua potable, esta suministra un caudal potabilizado y continuo entre 5500 a 5800 gpm a una refinera de crudo para sus operaciones. Durante 5,83 años se registraron 28 fallas en las bombas P-1, P-1A y P-1S (tasa de falla = 4,8 Fallas/Año), condición que se convirtió en una no conformidad al no poder cumplir con los requisitos de desempeño, entre ellos la meta establecida de 2 años

para el tiempo promedio entre fallas (TPEF) de estos equipos, lo que generó pérdidas económicas en el orden de los 256 M\$/D por cada parada no programada, razón que impulsó el uso de la técnica de Análisis RAM para evaluar el comportamiento de esta sección en un horizonte de 5 años en función de dos escenarios de pronósticos, el primero que se direccionó a seguir "Operando bajo el esquema actual" y el segundo que indicó un cambio de "Operar con un nuevo esquema". En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra la vista superior y configuración de los equipos asociados al sistema de bombeo.

**REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA VISTA SUPERIOR DE LA FOSA DE SUCCIÓN Y DISPOSICIÓN DE LAS BOMBAS**



**CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA CRUDA**



**Figura 3.1.** Vista superior y configuración de los equipos del Sistema de Bombeo de Agua Cruda. (Adaptación del autor del Documento PDVSA, RTIP-141-10:2010).

**3.1. Diagnóstico**

Los datos actualizados obtenidos en el proceso de Captura descrito en la tabla 2.4, permitieron identificar el no cumplimiento de los requisitos de desempeño establecidos para el sistema de bombeo de agua cruda, en la tabla 3.1 se pueden visualizar algunos de estos estándares operativos:

**Tabla 3.1.** Requerimientos de Desempeño para el Sistema de Bombeo de Agua Cruda. Fuente: Datos actualizados del proceso de Captura para el Análisis RAM.

<b>REQUERIMIENTOS DE DESEMPEÑO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA CRUDA</b>	
Filosofía Operacional	<b>2 Bombas Operando, 1 Bomba en Stand By Sistema "K" de "N"</b>
Producción Requerida	5500 – 5800 gpm
Impactos Operacionales	1) Directamente a los procesos aguas debajo de la planta de tratamiento de agua potable. 2) Condición de baja carga, parada parcial o total de múltiples plantas de proceso en la Refinería. 3) Las paradas no programadas producen un impacto económico por el orden de los 256M\$/D.
Presión de descarga / temperatura	35 psi / 95°F
Calidad de agua cruda	Turbidez: 7 – 15000 NTU
Mantenimiento Preventivo	Ejecución de acciones de mantenimiento nivel II trimestralmente Inspecciones predictivas para toma de vibraciones cada 15 días
Procura de Repuestos	Proceso de un (1) año
Disponibilidad Operacional del Sistema	98,5%
TPEF Meta	Motores Eléctricos = 2 años      Bombas = 2 años
Valores de Vibración Norma ISO-10816	<b>Normales</b> ≤ 0.06 IPS/rms <b>Pre-Alerta</b> 0.11 – 0.17 IPS/rms <b>Alerta</b> ≥ 0.18 IPS/rms
TPPR Meta	<b>48 Horas</b>



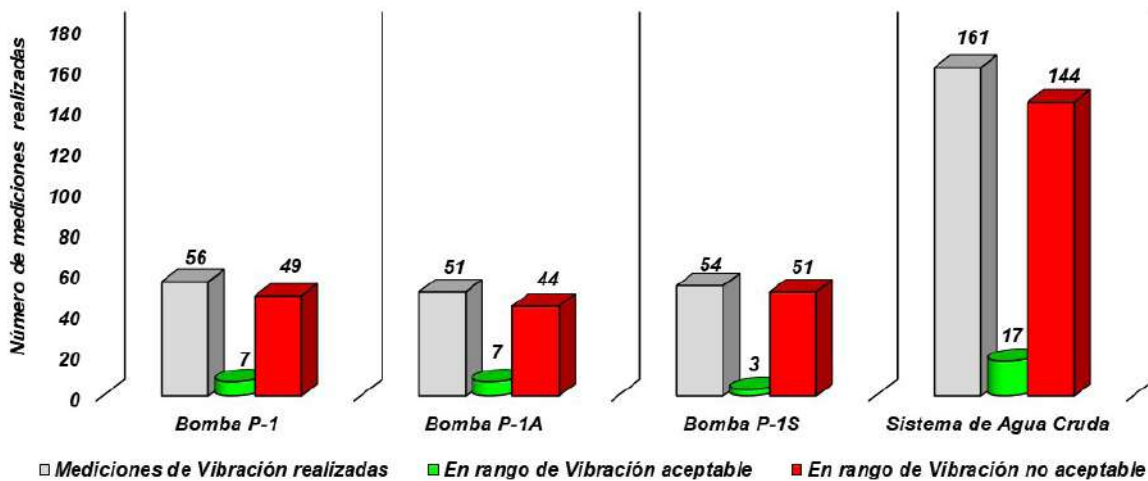
No conformidades encontradas, en el marco de la identificación de la situación actual del sistema:

- No se ejecutan las acciones preventivas de mantenimiento nivel II a los equipos dinámicos.
- Las inspecciones para la medición de vibraciones se cumplen parcialmente.
- La producción requerida de agua cruda no se cumple, por fallas recurrentes.
- El análisis de los valores de vibración evidencia que los equipos dinámicos operan bajo una condición de rangos de vibraciones no aceptables y en condición de avería.
- La disponibilidad operacional del sistema no ha alcanzado el valor de meta establecido de 98,5%.
- El TPEF meta de 2 años/ falla no es alcanzado.
- Los TPRR son demasiados altos.

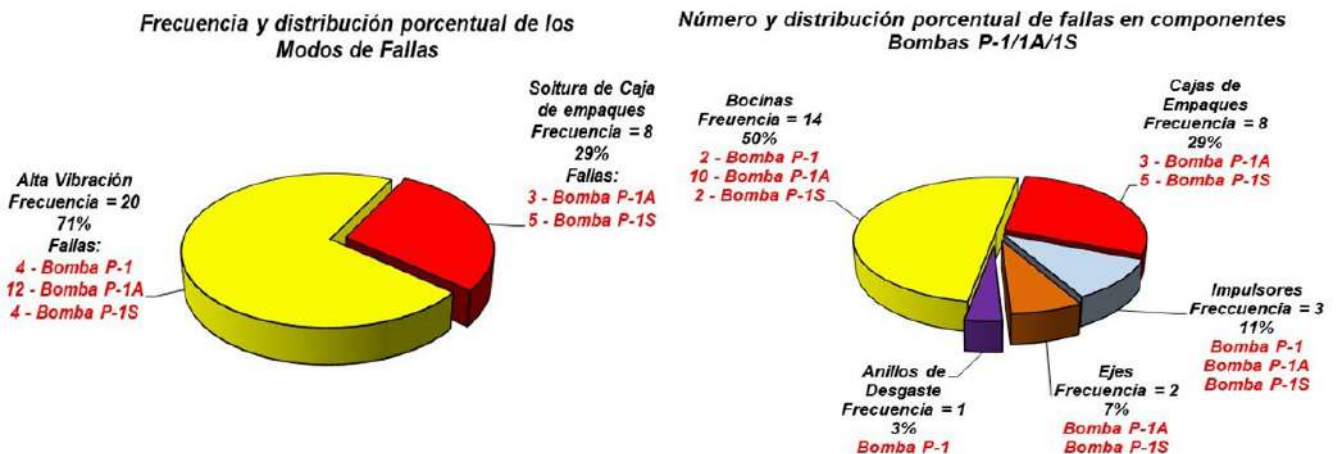
### 3.2. Resultados del Diagnóstico – Identificación de la situación actual.

La gráfica 3.1 muestra el número de mediciones realizadas durante el período de estudio, y la cantidad de estas en rango aceptable y no aceptable, de acuerdo a los valores establecidos como requisitos en la tabla 3.1. Esta información sustenta el diagnóstico basado en datos de deterioro conjuntamente con la gráfica 3.2, donde se aprecia la identificación de los modos de fallas, y los componentes fallados asociados a las bombas.

**Mediciones de vibración**



**Gráfica 3.1.** Número de mediciones de vibración en rangos aceptables y no aceptables. Fuente: Datos actualizados del proceso de Captura para el Análisis RAM.



**Gráfica 3.2.** Identificación de modos de fallas y componentes fallados en bombas. Fuente: Datos actualizados del proceso de Captura para el Análisis RAM.

En la tabla 3.2 se observan los resultados del diagnóstico basado en datos técnicos con la estimación de los indicadores de desempeño y sus respectivos valores metas.

**Tabla 3.2.** Estimación de Indicadores de Desempeño. Fuente: Datos actualizados del proceso de Captura para el Análisis RAM.

Denominación	Frecuencia de Falla (FF)	Disponibilidad (DI) Meta = 98,5%		Disponibilidad (DO) Meta = 98,5%	
		TPEF	TPPR	Disponibilidad Inherente	Disponibilidad Operacional
Bomba P-1	0,7 Falla/Año	0,98 Años/Falla 11,84 Meses/Falla	0,19 Años/Falla 2,35 Meses/Falla	83,76%	83,15%
Bomba P-1A	2,57 Falla/Año	0,29 Años/Falla 3,54 Meses/Falla	0,13 Años/Falla 1,6 Meses/Falla	69,05%	63,76%
Bomba P-1S	1,54 Falla/Año	0,44 Años/Falla 5,28 Meses/Falla	0,11 Años/Falla 1,33 Meses/Falla	80%	78,92%
Sistema de Agua Cruda	4,8 Falla/Año	0,41 Años/Falla 4,9 Meses/Falla	0,13 Años/Falla 1,62 Meses/Falla	75,93%	74,73%

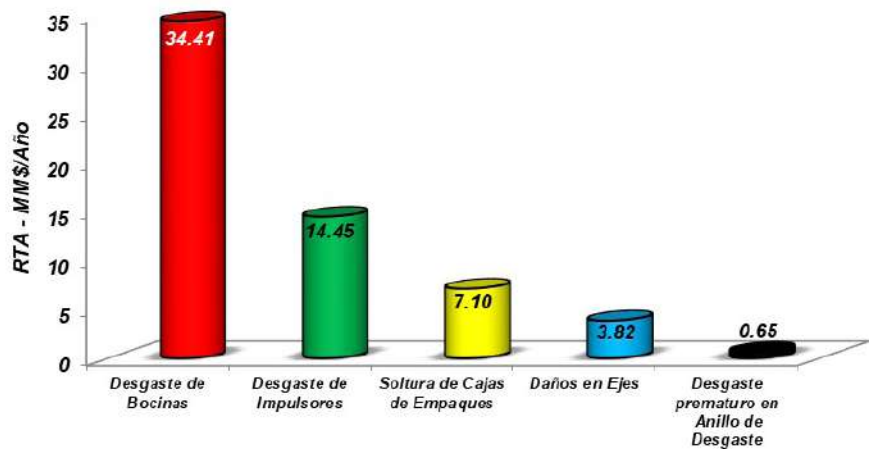
En la tabla 3.3, se presenta los tiempos medios para reparar por componente fallado.

**Tabla 3.3.** Tiempos medios para reparar por componente fallado en bombas. Fuente: Datos actualizados del proceso de Captura para el Análisis RAM.

Componente	Frecuencia de Fallas (FF)	TPPR
Bocinas	2,40 Fallas/Año	55,28 Días/Falla 1327 Horas/Falla
Caja de Empaques	1,37 Fallas/Año	19,87 Días/Falla 477 Horas/Falla
Impulsores	0,51 Fallas/Año	110,66 Días/Falla 2656 Horas/Falla
Eje	0,34 Fallas/Año	44 Días/Falla 1056 Horas/Falla
Anillo de Desgaste	0,17 Fallas/Año	15 Días/Falla 360 Horas/Falla

Como complemento del diagnóstico en base a indicadores de desempeño se determinó el impacto económico por modos de fallas mediante la estimación del riesgo total anualizado (RTA). En la gráfica 3.3 se observa la jerarquización de los modos de fallas en función del riesgo.

**Jerarquización de los Modos de Fallas Riesgo Total Anual**



**Gráfica 3.3.** Jerarquización de los modos de fallas en función del riesgo. Fuente: Datos actualizados del proceso de Captura para el Análisis RAM.

Durante el proceso de captura de información previa para la fase de diagnóstico no se pudo obtener el historial de fallas de los motores eléctricos, solo el dato que la pérdida funcional de estos equipos fue inducida por las bombas, debido a que estas estuvieron operando bajo una condición típica de avería. Por esta razón, y al no contar con datos actualizados para los equipos de accionamiento, se consultó el OREDA Handbook (repositorio de información sobre datos de

confiabilidad offshore de la industria petrolera) y se tomaron en consideración 8 modos de fallas (con base en opinión de expertos) para la estimación de los TPEF y los TPRR, necesarios para la etapa del tratamiento estadístico (caracterización probabilística y simulaciones).

Los TPEF y TPRR de los motores eléctricos, se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** TPEF y TPRR de los motores eléctricos. Fuente: estimación con datos de confiabilidad de equipos de OREDA Handbook 2002.

Data de OREDA Handbook 2002 - Motores eléctricos - TPF								
Taxonomía 2.2	Modos de falla							
Parámetros	FTS	BRD	ELU	NOI	OHE	STD	VIB	OTH
Distribución Gamma	FTS	BRD	ELU	NOI	OHE	STD	VIB	OTH
$\mu$ (fallas/10 <sup>6</sup> horas)	3,97	1,53	0,48	0,49	0,44	1,13	1,32	1,31
$\lambda$ OREDA	1.067E-05	TPPF - (Horas)			93720,712			

Data de OREDA Handbook 2002 - Motores eléctricos - TPR								
Modos de falla	FTS	BRD	ELU	NOI	OH E	ST D	VI B	OT H
Cantidad de falla	22	9	2	3	2	11	9	5
TPR - (Horas)	17,2	12,4	34,5	6,3	3	17,1	17,1	15,5
TPPR - (Horas)	15.927							

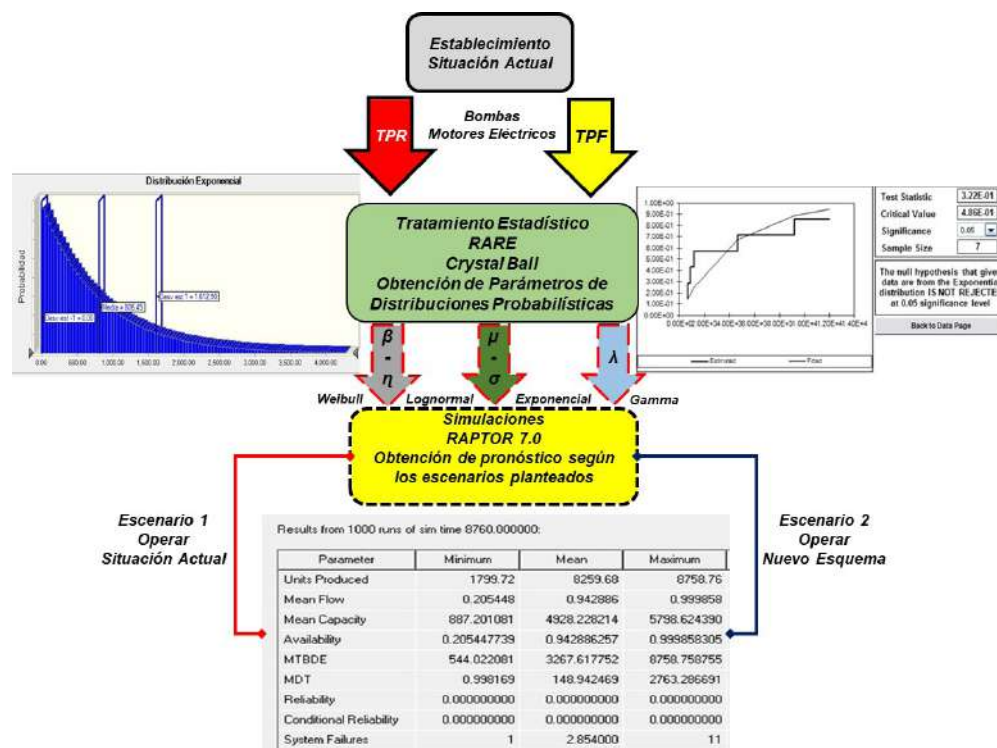
### 3.3. Resultados del Análisis RAM

La obtención de los pronósticos se realizó a través del planteamiento de los siguientes escenarios:

- “Escenario 1”: con este se direccionó al sistema de bombeo de agua cruda a seguir operando bajo el esquema de situación actual identificado (ver puntos 3.2), y en el
- “Escenario 2”: se propuso el cambio a un nuevo esquema de operación, donde se consideraron las no conformidades

expresadas en el punto 3.1, y en función de estas y a través de la opinión de expertos se redujeron los TPR, se adicionaron los recursos materiales, se aplicaron actividades de mantenimiento preventivo “Nivel III” con una frecuencia anual y de “Nivel IV” cada 4 años, a los motores eléctricos, bombas y fosa de succión de esta sección.

En la figura 3.2, se visualiza el proceso que se utilizó para generar los pronósticos para el sistema de bombeo de agua cruda.



**Figura 3.2.** Proceso de obtención de pronósticos según los escenarios planteados. Fuente: Yáñez et al (2007) – Adaptada por el autor.

El DBD del Sistema de Bombeo de Agua Cruda se observa a continuación en la figura 3.3.

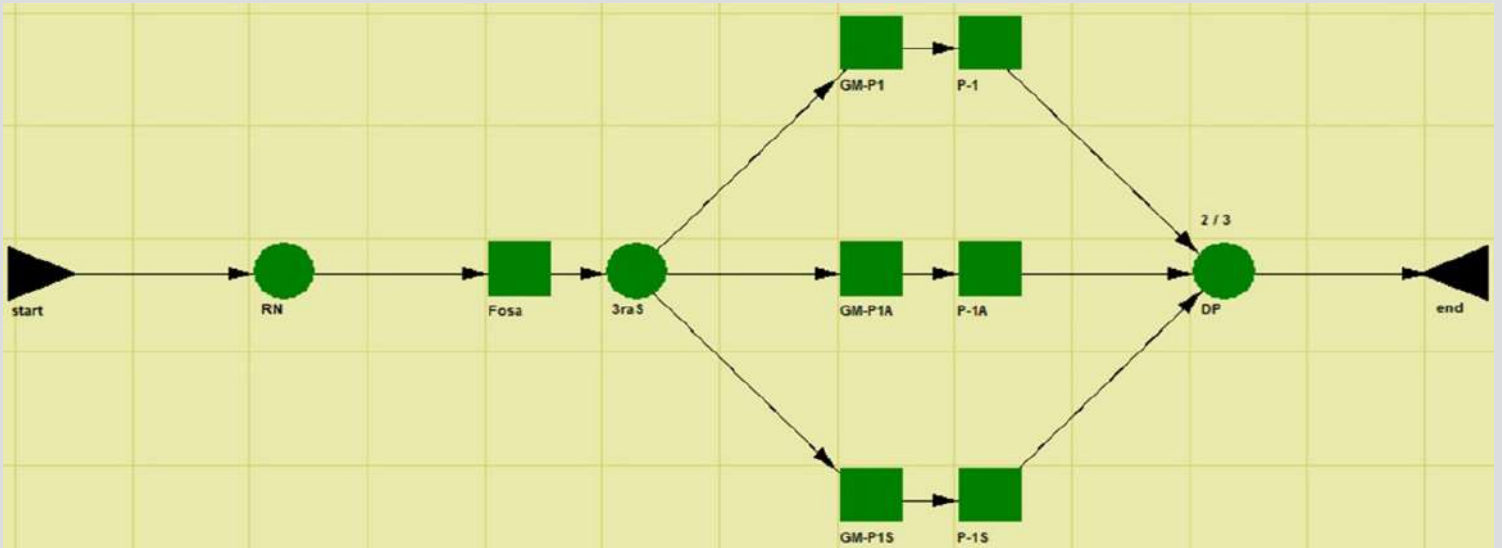
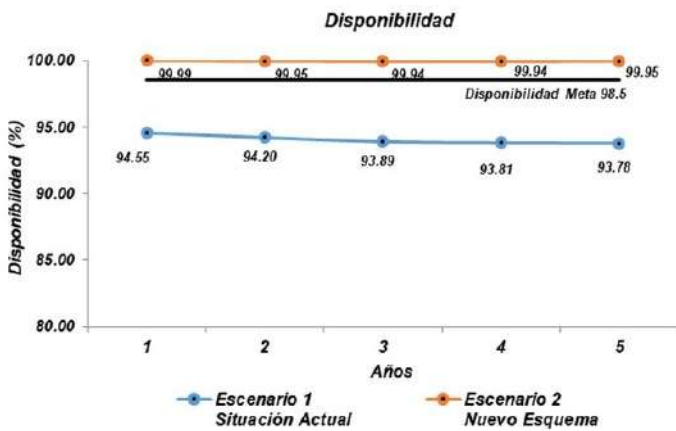


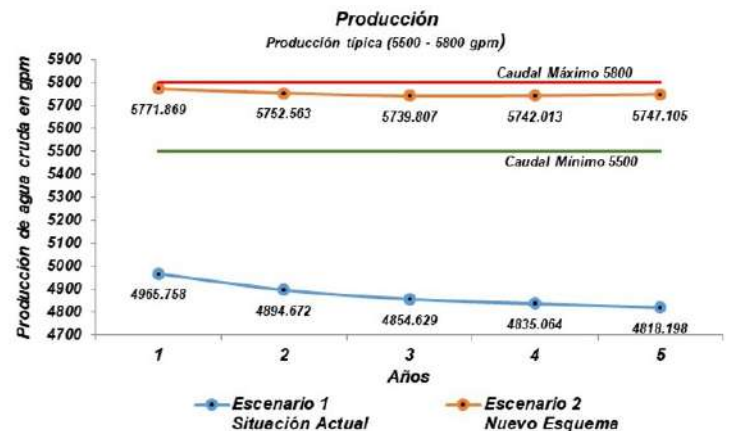
Figura 3.3. DBD del Sistema de Bombeo de Agua Cruda. Fuente: Raptor 7.0.

La gráfica 3.4 muestra el pronóstico de la disponibilidad anual del sistema para los escenarios 1 y 2.

La producción anual esperada para los escenarios 1 y 2 se observa a continuación en la gráfica 3.5.

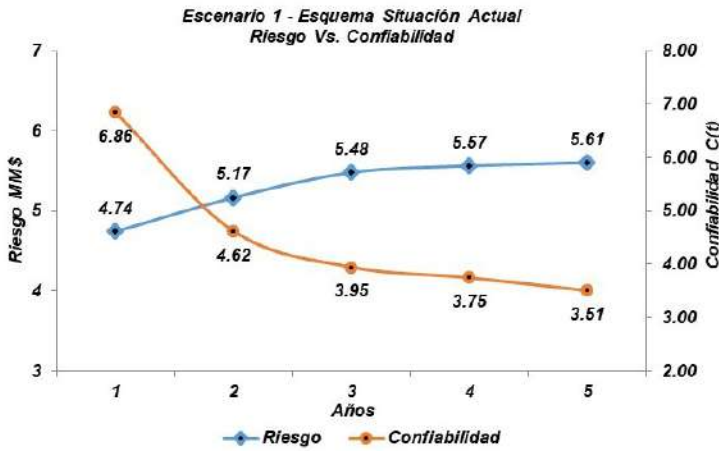


Gráfica 3.4. Disponibilidad Escenario 1 y 2.  
Fuente: Simulación con Raptor 7.0 – Adaptada por el autor.

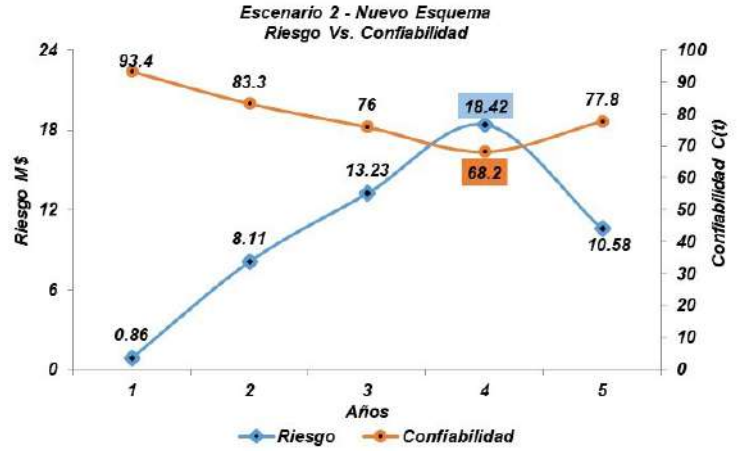


Gráfica 3.5. Producción Escenario 1 y 2.  
Fuente: Simulación con Raptor 7.0 – Adaptada por el autor.

Las tendencias de la confiabilidad y el riesgo se presentan en las gráficas 3.6 y 3.7.

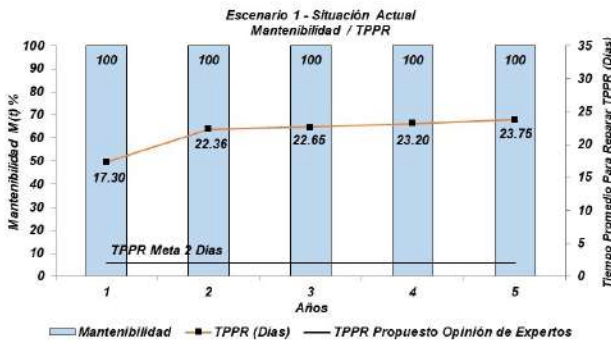


**Gráfica 3.6.** Confiabilidad Vs. Riesgo - Escenario 1. Fuente: Simulación con Raptor 7.0 – Adaptada por el autor.

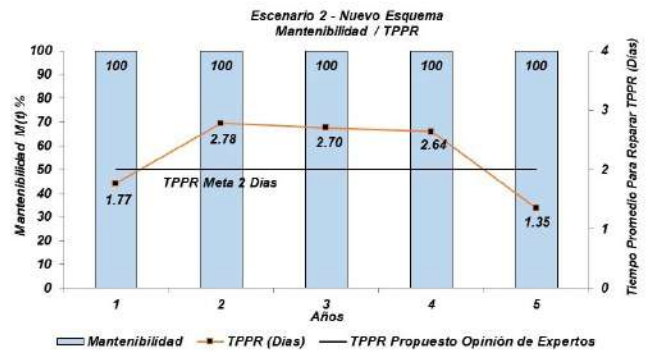


**Gráfica 3.7.** Confiabilidad Vs. Riesgo - Escenario 2. Fuente: Simulación con Raptor 7.0 – Adaptada por el autor.

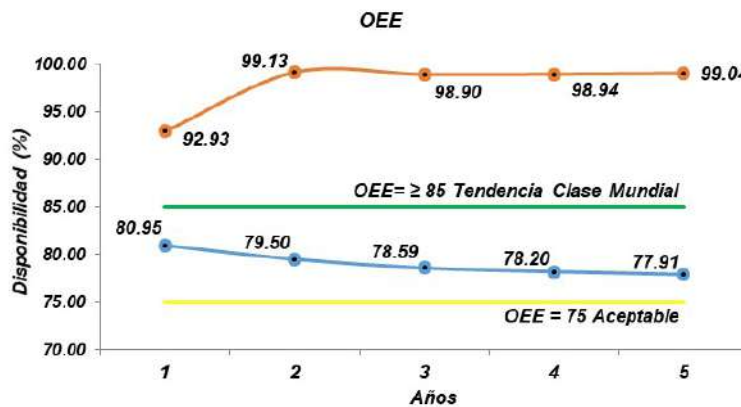
La mantenibilidad y los TPR se observan en las gráficas 3.8, 3.9 y en la 3.10 se visualiza el OEE de los escenarios 1 y 2.



**Gráfica 3.8.** Mantenibilidad y TPR - Escenario 1. Fuente: Simulación con Raptor 7.0 – Adaptada por el autor.



**Gráfica 3.9.** Mantenibilidad y TPR - Escenario 2. Fuente: Simulación con Raptor 7.0 – Adaptada por el autor.



**Gráfica 3.10.** OEE - Escenarios 1 y 2. Fuente: Resultados probabilísticos de Raptor 7.0 – Adaptados por el autor.

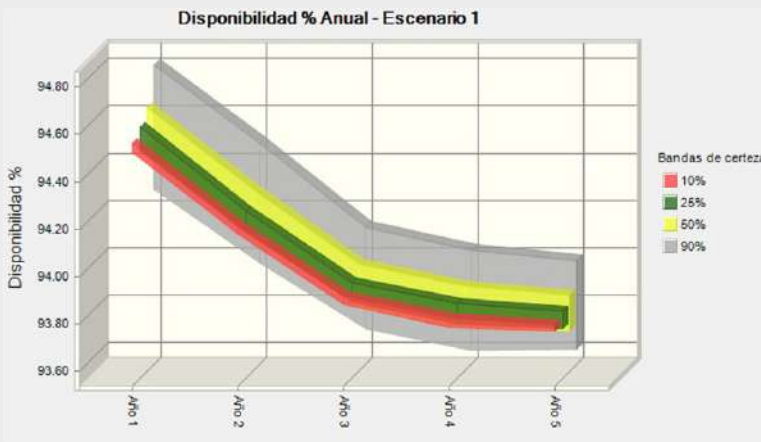
En la tabla 3.5, se presenta el pronóstico de la Disponibilidad de cada uno de los equipos de producción, su condición operacional, las fallas esperadas para el sistema de bombeo de agua cruda y por último se identifican los Malos Actores.

**Tabla 3.5.** Disponibilidad, condición operacional, fallas esperadas y equipos Malos Actores.

Fuente: Resultados probabilísticos de Raptor 7.0 – Adaptados por el autor.

<b>Disponibilidad (D(t)%) y condición operacional esperada para los Equipos del Sistema de Bombeo de Agua Cruda</b>												
Años		1		2		3		4		5		
Escenarios	Equipos	D(t) %	Estado	D(t) %	Estado	D(t) %	Estado	D(t) %	Estado	D(t) %	Estado	Tendencia
<b>1</b>	Fosa	99.96	Operando	99.96	Operando	99.96	Operando	99.96	Operando	99.96	Operando	
	Motor Eléctrico P-1	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	
	Motor Eléctrico P-1A	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	
	Motor Eléctrico P-1S	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	
	Bomba P-1	84.63	Falla Avería	77.82	Falla Avería	75.82	Falla Avería	74.45	Falla Avería	73.78	Falla Avería	
	Bomba P-1A	59.71	Falla Avería	58.82	Falla Avería	58.19	Falla Avería	58.10	Falla Avería	58.57	Falla Avería	
	Bomba P-1S	76.78	Falla Avería	70.12	Falla Avería	69.31	Falla Avería	67.31	Falla Avería	66.30	Falla Avería	
	Fallas esperadas		3.87		8.32		12.85		17.15		21.20	
<b>2</b>	Fosa	100	Operando	100	Operando	100	Operando	100	Operando	100	Operando	
	Motor Eléctrico P-1	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	
	Motor Eléctrico P-1A	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	
	Motor Eléctrico P-1S	99.99	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	99.98	Operando	
	Bomba P-1	99.25	Operando	98.36	Operando	98.35	Operando	98.50	Operando	98.93	Operando	
	Bomba P-1A	97.32	Operando	95.44	Operando	95.41	Operando	95.83	Operando	96.92	Operando	
	Bomba P-1S	98.12	Operando	96.60	Operando	96.54	Operando	96.95	Operando	97.73	Operando	
	Fallas esperadas		0.27		1.01		1.55		1.83		0.53	

En las gráficas 3.11 y 3.12 se representan las tendencias de la disponibilidad anual esperada del sistema de bombeo de agua cruda mediante un perfil estocástico enmarcado específicamente en rangos de certeza del 90, 50, 25 y 10%. Estas bandas representan el rango de certeza en que los valores pronosticados de la disponibilidad tienen la probabilidad de darse como habilitadores de desempeño para los equipos de producción, disminuyendo así la incertidumbre. Asociando los perfiles estocásticos previstos para los escenarios 1 y 2 se estimó la pérdida de la oportunidad en función de la indisponibilidad y los resultados se pueden observar a continuación en las tablas 3.6 y 3.7.



**Gráfica 3.11.** Perfil Estocástico de la Disponibilidad - Escenarios 1.  
Fuente: Resultados probabilísticos de simulación Monte Carlos con Crystal Ball.



**Gráfica 3.12.** Perfil Estocástico de la Disponibilidad - Escenarios 2.  
Fuente: Resultados probabilísticos de simulación Monte Carlos con Crystal Ball.

**Tabla 3.6.** Pérdida de Oportunidad por Indisponibilidad – Escenario 1.  
Fuente: Resultados probabilísticos de Raptor 7.0 y Crystal Ball – Adaptados por el autor.

Pronósticos de Pérdidas de Oportunidad por Indisponibilidad Sistema de Bombeo de Agua Cruda - Escenario 1				
Año	Disponibilidad %	Indisponibilidad %	Producción Diferida MMGPA	Pérdida de Oportunidad MMUSD/Año
1	94.55	5.45	438.48	5.09
2	94.20	5.80	475.84	5.42
3	93.89	6.11	496.89	5.71
4	93.81	6.19	507.17	5.78
5	93.78	6.22	516.04	5.81
Totalización			2434.41	27.81

**Tabla 3.7.** Pérdida de Oportunidad por Indisponibilidad – Escenario 2.  
Fuente: Resultados probabilísticos de Raptor 7.0 y Crystal Ball – Adaptados por el autor.

Pronósticos de Pérdidas por Indisponibilidad Sistema de Bombeo de Agua Cruda - Escenario 2				
Año	Disponibilidad %	Indisponibilidad %	Producción Diferida MMGPA	Pérdida de Oportunidad USD/Año
1	99.99	0.01	14.79	13081.6
2	99.95	0.05	24.93	48588.8
3	99.94	0.06	31.64	55129.6
4	99.94	0.06	30.48	57932.8
5	99.95	0.05	27.80	47654.4
Totalización			129.64	222387.20

El diagnóstico realizado para la identificación de la situación actual del sistema de bombeo de agua cruda y la determinación de no conformidades, evidenciaron que no se aplicaba mantenimiento preventivo a los equipos de producción, aún con la existencia de un plan para ello, en razón de esta condición, el Escenario 2 se enmarcó en una simulación con base fundamental en la aplicación de acciones

preventivas nivel III y IV, observándose de esta manera un incremento de la disponibilidad y la confiabilidad de la sección. Además del diagnóstico integral que se logró con la aplicación del RAM, adicionalmente se efectuó una revisión y se mejoró el plan de mantenimiento preventivo existente. A continuación, en la tabla 3.8 se presenta un extracto de esa optimización.

**Tabla 3.8.** Plan de Mantenimiento Preventivo Sistema de Bombeo de Agua Cruda.  
Fuente: Resultados de optimización del plan existente – Adaptados por el autor.

Plan de Mantenimiento Sistema de Bombeo de Agua Cruda				
Aspectos	Acción para prevenir la ocurrencia de fallas y preservar la función de los activos.	Frecuencia	Responsables de Ejecución	Nivel de Mantenimiento
Continuidad Operacional	Verificar y validar el juego radial del eje en la columna de succión de la bomba.	Anual	Mantenimiento	III
	Inspeccionar la condición física de los pernos de anclaje de la bomba, ajustar o reemplazar según su condición.	Anual	Mantenimiento	III
	Verificar el estado de la caja (holguras y dimensiones entre el eje, empaques y bocinas).	Anual	Mantenimiento	III
	Verificar la nivelación y el estado físico de la bomba.	Anual	Mantenimiento	III
	Inspeccionar el filtro de succión y reemplazar según sea su condición.	Anual	Mantenimiento	III
	Realizar pruebas de resistencia del aislamiento del devanado, índice de polarización e índice de absorción al motor eléctrico.	Anual	Mantenimiento	III
	Reacondicionamiento del Gavión o Rompe Caudal.	Anual	Operaciones	IV
	Verificar y reemplazar los empaques según sea su condición.	Cada 4 Años	Proyectos Operacionales	IV
	Reemplazar anillos de desgaste según condición.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Reemplazar bocinas.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
Seguimiento de desempeño	Inspeccionar el estado físico del acople y reemplazar según sea su condición.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Reemplazar los tazonos del impulsor de la bomba o según su condición.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Inspeccionar el estado del ventilador del motor eléctrico y sus elementos de fijación; ajustar y/o reemplazar según su condición.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Realizar prueba de deflexión del eje del motor eléctrico.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Reemplazar los rodamientos del motor eléctrico	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Realizar balanceo, alineación y prueba de vibración del rotor del motor eléctrico.	Cada 4 Años	Mantenimiento	IV
	Dragado del lecho del Río Neverí adyacente a la fosa de succión.	De 6 a 8 Años	Operaciones	V
			Proyectos Operacionales	V

## 4. Recomendaciones

Realizar un Análisis Causa Raíz para identificar las causas raíces que generan los modos de fallas de “Alta Vibración” y “Soltura de Caja de Empaques” en las bombas del sistema.

Ejecutar las acciones preventivas de mantenimiento “Nivel I” diariamente, “Nivel II” con una frecuencia quincenal y trimestral, “Nivel III” anualmente, “Nivel IV” cada 4 años y “Nivel V” entre 6 y 8 años, para incrementar la confiabilidad y reducir la tasa de fallas.

## 5. Conclusiones

Con el diagnóstico integrado, se identificó que las bombas P-1/1A/1S son los equipos malos actores del sistema de bombeo de agua cruda, teniendo una tasa de falla de 4,8 Fallas/Año, generada por los modos de falla de “Alta Vibración” y “Soltura de Caja de Empaque”, con un TPEF de 4,9 Meses/Falla versus una meta establecida de 24 Meses/Falla y una Disponibilidad Operacional del 74,76% con un 98,5% a cumplir.

Se pronosticó que, si el sistema sigue operando bajo la situación actual, para los próximos 5 años el valor máximo esperado de la disponibilidad será de 94,2%. La probabilidad de falla será muy alta, aumentando

a 97,3% en el año 5, y se incrementará la tasa de falla hasta 17 Fallas/Año.

Con la opción de “Operar con un nuevo esquema” el sistema tendrá una disponibilidad esperada con un valor mínimo de 99,93%, evidenciándose valores esperados por encima de la meta establecida del 98,5%. La confiabilidad disminuirá en el tiempo desde 94,2%, a una tasa de aproximada de 10% anual, con la condición que en el año 4 cuando se ejecuten las acciones de mantenimiento “Nivel IV” aumentará a 77,9% hasta el año 5. Por otro lado, la tasa de falla esperada será de 0,24 Fallas/Año.

Se determinó que la OEE y el riesgo probabilístico, bajo el enfoque de “Operar con un nuevo esquema” alcanzarán valores esperados de tendencia mundial  $\geq 85\%$  y un máximo en pérdidas de 18,81 M\$/Año respectivamente.

El perfil estocástico asociado al escenario de “Operar con un nuevo esquema”, nos demarca un horizonte prácticamente sin indisponibilidad en el sistema de bombeo, si se toma el 98,5% como valor marcador, lo que abre una brecha para definir estrategias con el fin de disminuir aún más el margen de la producción diferida y la pérdida de oportunidad con respecto a un 100%.

## 6. Referencias

Oreda (2002), *Offshore Reliability Data, 4th Edition*, SINTEF Industrial Management.

Parra C., Crespo A., (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*. Sevilla, España: Ingeman.

Organización Internacional de Normalización (2014). *ISO-55000 Gestión de activos - Aspectos generales, principios y terminología*, Primera Edición, norma técnica de la Organización Internacional de Normalización.

Organización Internacional de Normalización (2016). *ISO-14224 Recopilación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos para las industrias del Petróleo, Petroquímica y Gas Natural*, Tercera Edición, norma

técnica de la Organización Internacional de Normalización.

Yáñez M., (2007). *Ingeniería de Confiabilidad de Equipos*. Reliability and Risk Management, S.A. Venezuela.

Yáñez M., (2007). *Análisis Funcional de Sistemas*. Reliability and Risk Management, S.A. Venezuela.

Ferrara, A. (julio, 2019). *Modelos Probabilísticos*. PREDICTIVA21, Año 6 (26), 13.

Knowledge and Integration Architects (2008). *Guía para la formalización de conocimientos prácticos en gestión de mantenimiento y confiabilidad, para la certificación SMRP*, Primera Edición, Guía de estudios.



**PREDICTIVA21**

---

[contacto@predictiva21.com](mailto:contacto@predictiva21.com)

[www.predictiva21.com](http://www.predictiva21.com)