

PREDICTIVA 21

Aprender y mejorar constantemente

Ramesh Gulati

AMEF y su
aplicación en
Machine Learning

Gerencia de
Proyectos e
Ingeniería: Salarios
y Libertad

Optimizando el
Mantenimiento:
Métodos Matemáticos
y Estadísticos

Cursos 100% grabados para
completar al ritmo deseado



Aplicación de la norma
ISO 14224



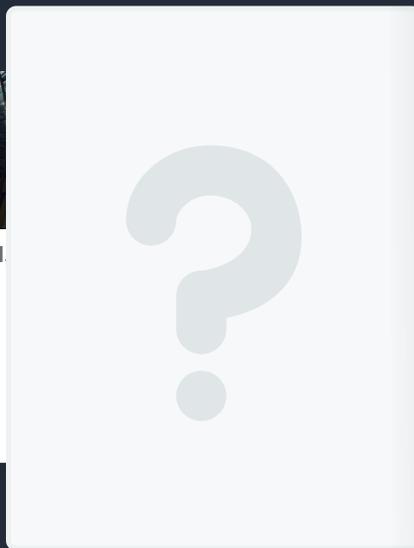
Tibaldo Díaz



Análisis de Confiabilidad,
Disponibilidad y
Mantenibilidad (RAM)



Joaquín Santos



Gestión de costos de
mantenimiento



Lourival Tavares



Evaluación de sistemas
críticos



José Contreras

Explora los cursos
<https://predyc.com>



Índice

- 4** Editorial
- 6** Entrevista a Ramesh Gulati
- 11** **Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) y su uso en Machine Learning aplicado a procesos productivos**
Carlos Alberto Villegas Morán
- 20** Entrevista a José Contreras
- 24** **Optimizando la planificación del mantenimiento de sus activos y la medición de productividad mediante tecnologías de IoT en Industria 4.0**
Ing. Guillermo Riva Cra. y Gisela L. Ledesma
- 31** Entrevista a Brau Clemenza
- 35** **Optimizando el Mantenimiento: métodos matemáticos y estadísticos: casos y tendencias**
Manoel Segadas
- 42** Entrevista a Johanna Duran
- 46** **Gerencia de Proyectos e Ingeniería: Salarios y Libertad**
José Antonio Salazar y Luis F. Marín
- 56** Entrevista a Dr. Giacomo Barbieri
- 60** **Un caso de estudio para el aprendizaje basado en problemas en la evaluación del diagnóstico de averías**
Giacomo Barbieri, David Sánchez Londoño, Laura Cattaneo, Luca Fumagalli y David Romero
- 70** **Cálculo de reducción de costos por filtración de aceites**
José Páramo
- 74** **¿Qué implica la mejora continua en la gestión de activos?**
Equipo Fractal
- 79** **¿Cómo serán las fábricas dentro de una década? La transformación progresiva hacia la Smart Factory**
Toni Laserna García
- 84** **Integración de la Termografía Infrarroja como técnica del Mantenimiento Predictivo en el diagnóstico de condiciones de compresores recíprocos**
Odlanier José Mendoza Mayorga

Editorial



Andrés González
Editor y CEO de Predictiva21

Aprender y mejorar constantemente

El aprendizaje y mejora continua son un elemento esencial de la vida. Con el avance de la Inteligencia Artificial tenemos la responsabilidad de aprender a manejar a las máquinas de la mejor manera posible, y ¿qué mejor máquina para aprender a manejar que nuestro cuerpo y mente? En Predictiva21 nos centramos en lo referente al Mantenimiento, Confiabilidad y Gestión de Activos, destacamos artículos técnicos sobre temas de actualidad, personalidades y eventos de interés para quienes conforman el mundo de la ingeniería predictiva y el mantenimiento.

DIRECTORIO

Enrique González
Fundador
enrique.gonzalez@predictiva21.com

Andrés González
Director Ejecutivo y Editor
andres.gonzalez@predictiva21.com

Alejandro Godoy
Director de Mercadeo y Capacitación
alejandro.godoy@predictiva21.com

Carlos Villegas
Director Editorial
carlos.villegas@predictiva21.com

Montserrat Souza
Coordinadora de Mercadeo
montserrat.souza@predictiva21.com

Daniel Farfán
Diseñador Gráfico
daniel.farfan@predictiva21.com

Para esta edición contamos con varios entrevistados, el reconocido ingeniero Ramesh Gulati y los destacados ingenieros latinoamericanos: José Contreras, Brau Clemenza, Johanna Durán y Giacomo Barbieri. Cada uno de ellos haciendo presencia en diversas zonas del continente y brindando sus aportes a la industria mediante libros, investigaciones, enseñanzas, cursos y consultorías.

Nuestros articulistas nos comparten información muy provechosa. Respecto a la Industria 4.0, Machine Learning y análisis de equipos, Carlos Villegas, Guillermo Riva, Gisela Ledesma, Manoel Segadas, Giacomo Barbieri, David Sánchez, Laura Cattaneo, David Romero, Toni Laserna y Odlanier Mendoza nos aportan sus investigaciones y casos prácticos. En lubricación José Páramo brinda una útil herramienta para el “Cálculo de reducción de costos por filtración de aceites”. Respecto al factor humano José Salazar y Luis Marín nos hablan de “Gerencia de Proyectos e Ingeniería: Salarios y Libertad”. También el equipo de Fractal nos plantea la incógnita “¿Qué implica la mejora continua en la gestión de activos?”.

De parte del equipo de Predictiva21 agradecemos enormemente a todos nuestros colaboradores articulistas, publicitantes y lectores, ustedes son los que hacen posible que esta iniciativa exista y siga creciendo cada vez más. Les deseamos una lectura muy provechosa.

Seguimos aprendiendo y mejorando.

SAP



Reliabytics

Solución de APM Basada en Analíticas que permite lograr:



3% - 35%

Reducción de incidentes



5% - 20%

Aumento de Productividad



2% - 6%

Aumento de Disponibilidad



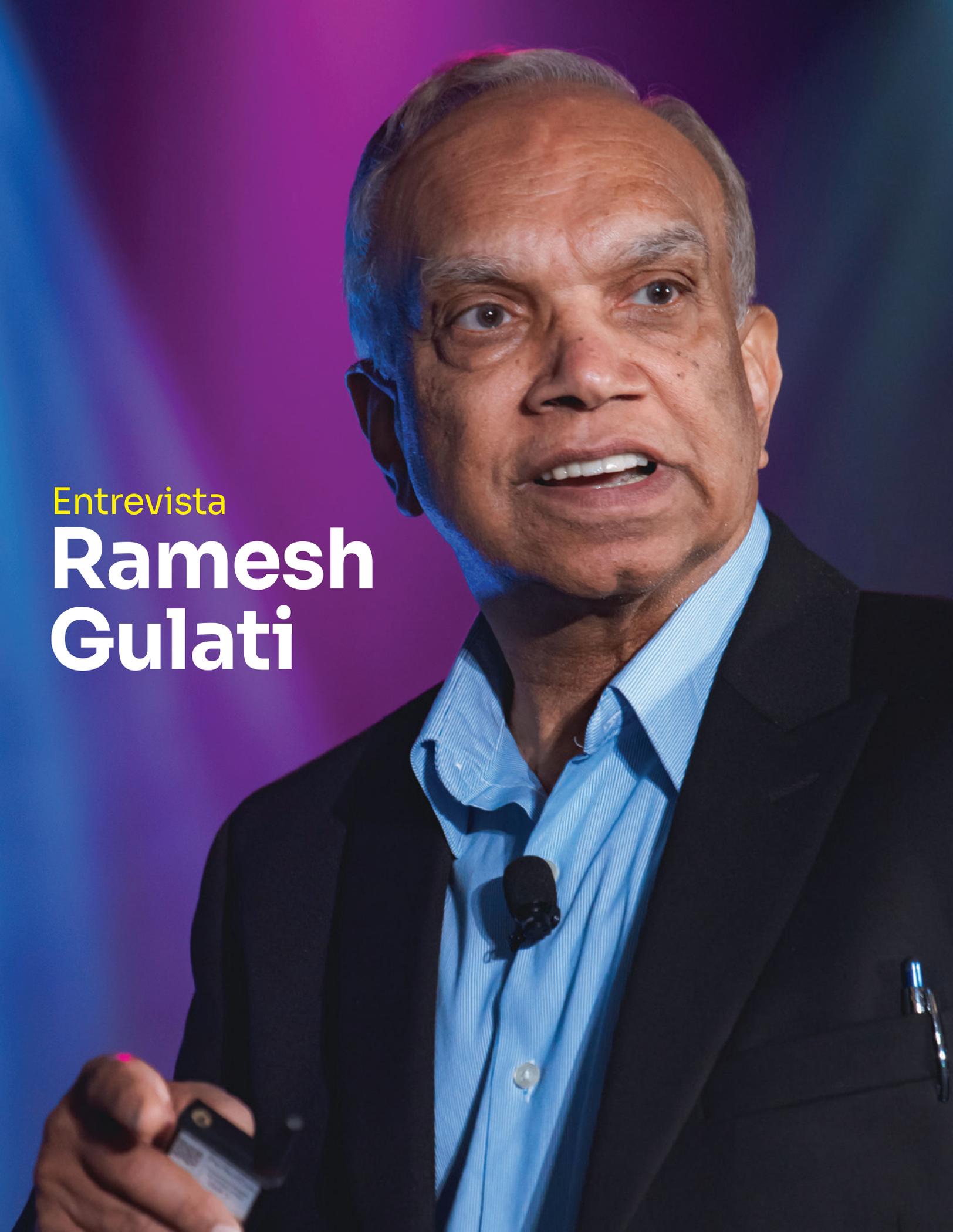
5% - 10%

Reducción de Costos de Inventario



10% - 40%

Reducción Mtto. Reactivo

A portrait of Ramesh Gulati, an older man with grey hair, wearing a dark suit jacket over a light blue striped shirt. He is holding a small black device in his right hand and has a microphone clipped to his shirt. The background is a gradient of purple and blue.

Entrevista

Ramesh Gulati

Ramesh Gulati

Agente de cambio, profesor y líder de opinión, conocido como Reliability Sherpa.

Ramesh Gulati es un líder de renombre mundial en el campo del mantenimiento, la confiabilidad y la gestión de activos. Tiene una licenciatura en ingeniería mecánica, un máster en ingeniería industrial y un máster en administración de empresas. Sus certificaciones profesionales incluyen PE, CRL, CRE, CAMA, CMRP y CMRT.

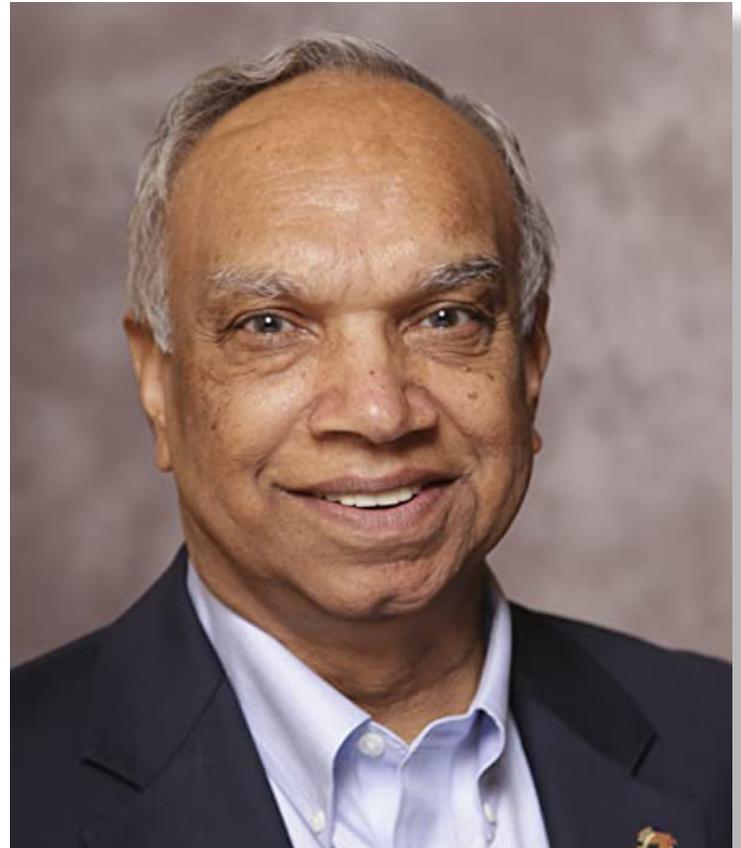
Ramesh ha trabajado durante más de 55 años en la industria como profesional. Ha ocupado numerosos puestos, como ingeniero de mantenimiento, ingeniero/analista de confiabilidad, director de mejora de procesos, director de ingeniería industrial, director de proyectos, director de confiabilidad, especialista en confiabilidad y gestión de activos, e ingeniero jefe. Ha trabajado en Jacobs-ATA/Sverdrup Technology Inc.; Arnold Engineering Development Complex, Tennessee; Carrier Air Conditioning; True Temper Corporation; Bethlehem Steel; y la planta HEC-Foundry Forge.

Ramesh es miembro activo de AMP, ASQ/Reliability, IISE, IAM, SMRP y UT/RMC. Es miembro de ISO/ANSI-US TAG-pc251 (ISO 55000) y TAG 56 (sostenibilidad). Ha participado activamente en la SMRP desde mediados de los años 90 y ha ocupado varios cargos, como el de presidente de conferencia, director de mejores prácticas, director de la certificación y presidente del comité de exámenes. Es miembro fundador de la Conferencia Internacional de Mantenimiento.

Ramesh recibió el premio Lifetime Achievement Award en la Reliability Conference, en Seattle, en mayo de 2019. Fue nombrado miembro de la AEDC y recibió el "Life Time Achievement Award" en agosto de 2020 en Arnold Center, Tennessee. Fue nombrado como veteran CMRP del año (2014) por la Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad.

Es autor de varios libros, incluyendo el premiado *Maintenance & Reliability Best Practices, 3ª ed., 10 Rights of Asset Management*, y *Uptime Elements DICTIONARY for Reliability Leaders & Asset Managers*. Además, ha escrito numerosos artículos sobre mantenimiento y confiabilidad, gestión de activos, mejoras de la productividad, aplicación de normas y desarrollo de la mano de obra.

Ramesh es un ponente habitual en muchas conferencias y reuniones profesionales y enseña regularmente en varias universidades, como la estatal de Mississippi, Tennessee y Wisconsin.



Ramesh Gulati ¿Dónde te encuentras y que estás haciendo hoy en día?

Actualmente, vivo al sur de Nashville, TN USA. Estoy algo cansado después de 57-58 años de trabajo, pero todavía en el ámbito privado me mantengo comprometido conmigo mismo. Entendí hace mucho tiempo por uno de mis ídolos, Mahatma Gandhi, que el aprendizaje nunca se detiene, y que a medida que envejecemos nos damos cuenta de que realmente no sabemos mucho y que aún nos falta por aprender. Uno de mis deseos para este 2022 es compartir conocimiento con mis amigos. Esa es la razón por la que escribí mis libros años atrás y los sigo actualizando. También me dedico a enseñar en diferentes universidades, dictar conferencias y seminarios en diferentes lugares. Como me estoy haciendo mayor, estoy trabajando para mantener mi ritmo y poder compartir mis conocimientos. Eso es lo que estoy tratando de hacer.

¿Cómo inicia su carrera en Mantenimiento, Confiabilidad y Gestión de activos?

Esta pregunta es interesante. Yo estaba en la India, después de que me gradué comencé a trabajar en una empresa grande como ingeniero de mantenimiento. Lo que aprendimos en la escuela había sido muy diferente a como eran las cosas en la vida real y en el trabajo. Tuve que aprender de la manera difícil como funcionan las cosas. En la universidad nos enseñan desde el punto de vista teórico, y en el trabajo debemos arreglárnosla por realmente entender. Entre las cosas que realicé en mi trabajo hubo cosas muy interesantes como por ejemplo trabajar con equipos de personas, educar y también ayudar a capacitar.

Luego vine a los Estados Unidos, cerca de 1970. Fue entonces hace casi más de 50 años que comencé a trabajar de nuevo con la maquinaria y entendiendo a las personas. Me enfoqué en descifrar como hacer que las cosas mejoren, entender por que los activos fallan y qué hacemos para reducir estas fallas aplicando técnicas de confiabilidad.

Alrededor del año 2000 me encontraba en una de las más grandes instalaciones de prueba de la Fuerza Aérea, que tenía un valor de 12 billones de dólares en activos, altamente sofisticados. Había compresores, cajas de engranajes, motores de hasta 80000 caballos de fuerza. Intentamos cuidar de todos estos equipos, lo cual era muy costoso, por lo que iniciamos la implantación de un programa de confiabilidad

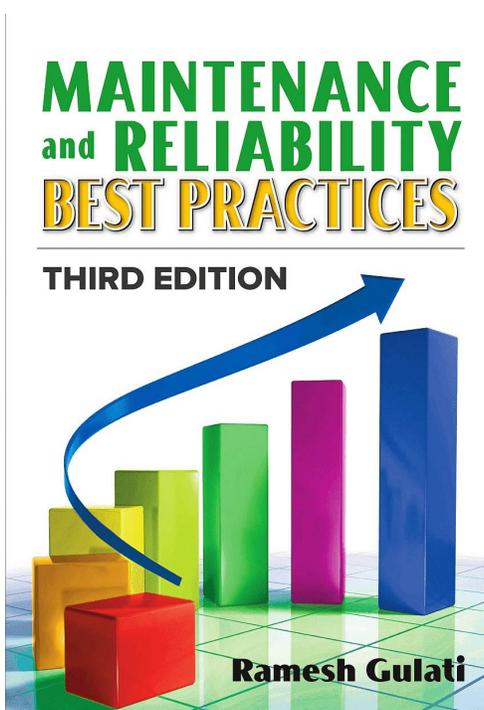
y a invertir en la educación del equipo. Enviábamos a nuestros colegas a diferentes seminarios y programas de estudio en universidades. Yo me encontraba aprendiendo al mismo tiempo, me involucré con la Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad (SMRP) siendo uno de los miembros fundadores del programa de certificación CMRP en 2001.

En 2006 mi amigo Terrence O'Hanlon me pregunta ¿Por qué no plasmar estos conocimientos en un libro?. Fue entonces cuando comencé a escribir mi libro de "Las Mejores Prácticas de Mantenimiento y Confiabilidad" (Maintenance & Reliability Best Practices). Traté de escribirlo con palabras simples, porque de lo contrario, si yo no lo entendía, la gente tampoco lo haría. Está destinado para que un técnico de mantenimiento o incluso una persona ajena a este departamento pudiera entenderlo. Fue bien aceptado. Creo que hice un buen trabajo, o al menos eso me han hecho pensar mis amigos.

Terrence y yo escribimos un libro sobre la **Gestión de Activos (10 Rights of Asset Management)**, porque lo que estábamos haciendo estaba enfocado únicamente al Mantenimiento y Confiabilidad. El concepto de "activo" y dicho viaje para nosotros comenzó en como diseñamos, construimos e instalamos estos equipos, y entendiendo que las etapas tempranas del activo juegan un papel importante en



su ciclo de vida. Anteriormente los equipos eran entregados en la instalación por los fabricantes y nos decían: "ok muchachos aquí está la máquina, hagan lo que deban hacer ahora", pero ya para entonces era muy tarde. Tenemos que involucrarnos como un equipo en la fase de conceptualización, diseño, procura, instalación y comisionamiento, verificar que todos los equipos estén cargados en nuestro CMMS, que existan procedimientos, planes de entrenamiento y formación, y es hasta entonces que procedemos a la operación.



¿Podrías decirnos por qué escribiste el libro de las Mejores Prácticas y como crees que ayuda a los profesionales de la comunidad?

El propósito que tiene el libro es el de educar estructurando las mejores prácticas: Desde el liderazgo, la planificación y programación del mantenimiento, llegando a un punto clave: la operación. El 40 % de los problemas o fallos suceden debido a la una mala operación, bien porque no saben lo que están haciendo o están tratando de cumplir unas metas y mal utilizan estos equipos simplemente para satisfacer la producción. Luego entramos en temas de confiabilidad, cómo calcularla en términos simples, intentando simplificar la data, para llegar a cómo educar y formar a los profesionales. En la edición mas reciente de este libro también se introducen los estándares y cómo juegan un rol importante en hacer nuestros procesos más robustos y correctos. Es un libro que cubre el cuerpo de conocimientos que un Profesional Certificado de Mantenimiento y Confiabilidad (CMRP) debería tener.

En el 2014 te fue otorgado un premio de excelencia por parte de la SMRP. ¿A que debió dicho reconocimiento?

Esta historia remonta a los años 90 mientras nos encontrábamos por educar a nuestro equipo de profesionales. Los enviábamos a diferentes seminarios, conferencias y universidades, pero aun nos preguntábamos: ¿Cómo podemos saber si realmente están calificados? ¿Es posible medir el conocimiento que han adquirido?. Para ese entonces otros colegas se encontraban haciendo lo mismo que yo. Todos coincidimos de una manera u otra en la Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad (SMRP). En ese momento nos enfocamos en identificar que conocimientos debían tener los profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad. Luego de 3 años de trabajo, encuestas y recopilación de información logramos coincidir en las principales áreas en las que debería desarrollarse un profesional: Gestión y administración del Negocio, Confiabilidad de activos, Organización y liderazgo, y Gestión del trabajo.

Juntamos todos estos conocimientos y creamos el examen de certificación CRMP para el 2001. Nuestro objetivo era conseguir que todas las plantas e instalaciones contaran con personal certificado CMRP. Comenzamos despacio.

En mi lugar de trabajo certificamos a un total de 120 personas, desde técnicos, in-



genieros, planificadores y gerentes. Fue un cambio cultural grande que tomo alrededor de 15 años. Uno de los retos más grandes fue convencer a mi jefe de tomar el examen para certificarse. Recuerdo que me dijo: ¿De qué hablas? En unos años ya estaré retirado. A lo que yo le pregunte: ¿Es usted un líder?. Luego de varias sesiones de platica, comprendió que como lider

debía dar el ejemplo. Si el no tomaba este examen, el resto tampoco lo haría. Al final accedió y terminó jugando un papel importante para que otros gerentes y colegas tomaran la certificación. Esto se extendió hasta los grupos de planificación, procura, recursos humanos y no únicamente el grupo de mantenimiento. Todos debían hablar el mismo lenguaje.



¿Qué planeas hacer ahora?

Buena pregunta, como mencioné anteriormente, estoy tratando de mantener mi ritmo, sé que mi cuerpo me está diciendo que me estoy haciendo viejo, pero creo que he aprendido de la manera más difícil, mantener la mente aguda y depender de lo joven que uno es, así que todavía me mantengo comprometido, tratando de actualizar los libros: **Workbook to Accompany Maintenance & Reliability Best Practices** y **10 Rights of Asset Management**. También Terrence y yo estamos buscando otro diseño para un

libro de confiabilidad. Tenemos un par de cosas en mente para compartir mis conocimientos, mientras tanto, todavía estoy enseñando en varias universidades.

Recibí una llamada de la gente del Oriente Medio, quieren hacer un seminario de un día, y lo voy a hacer, así que cada mes habrá una conferencia local sobre ingeniería, les voy a platicar en una sesión de dos horas sobre el diseño para la confiabilidad. Voy a ir a la SMRP, voy a hacer un pequeño taller con mis amigos sobre mantenimiento, estamos tra-

bajando con ellos para hacer un taller sobre la mejora de nuestra fuerza de trabajo.

Nuestra gente está haciendo el trabajo desde casa, mucha automatización está llegando con la IoT, existen muchos sensores inteligentes. Tenemos darle a nuestra gente algún tipo de conocimiento diferente, tenemos que prepararlos, así que estamos hablando de mejorar sus habilidades, tenemos que asegurarnos de que nuestra nueva generación entienda, y ese es otro desafío, se están perdiendo trabajadores, se quiere hacer todo de

manera electrónica, la ayuda a las personas de parte de las máquinas estará allí, así que tenemos que cuidar de ellas, por lo que tenemos que asegurarnos de que nuestra mano de obra más joven tenga un mejor conocimiento de cómo cuidar estos equipos.

Estoy tratando de ver cómo puedo ayudar a la nueva generación. En el estado de Tennessee han construido un nuevo centro de formación, me gustaría estar allí algún tiempo para platicar con los aprendices y transmitirles una visión general.



¿Algunas palabras que quieras compartir con tus colegas de América Latina?

Estoy contento de hacer esta entrevista. Espero poder transmitir este mensaje a través de mi cuenta de LinkedIn. Tengo muchos amigos allí, de todos los lugares en los que he trabajado donde hablan español, he estado en México un par de veces y también en Brasil.

Mi mensaje es:

El aprendizaje es profundo, siempre puedes desconocer algo, no digas que lo sabes todo. De hecho, yo aprendo y no se mucho, y aunque me esté haciendo mayor debo seguir aprendiendo. Así que sigue aprendiendo y mejorando.

Quien necesite alguna ayuda puede enviarme un email o un mensaje, si puedo ayudar allí estaré.

Estamos esperando una versión en español de tus libros.

Le he pedido a mi editor que trate de encontrar a un buen editor que viva en América Latina ya que me están pidiendo versiones en español y portugués de los libros, podríamos encontrar a un buen editor que tenga una buena reputación y eso es un reto. Si alguien logra encontrar a un editor con buena reputación y que pueda tomar la responsabilidad, puede contactarme a mi o a la editorial **Industrial Press** y estoy seguro de que todos podrán ver una versión en español de mi trabajo.



Ramesh Gulati

Reliability Sherpa semirretirado en Jacobs.

ramesh.gulati@hotmail.com





Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) y su uso en Machine Learning aplicado a procesos productivos



Carlos Alberto Villegas Morán

CMRP.

Ingeniero Mecánico con Especialización en Confiabilidad de Sistemas Industriales. Director de Operaciones de E&M Solutions S.A de C.V.

carlos.villegas@eymsolutions.com



1. Resumen

Tradicionalmente, el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) se ha utilizado en la industria para eliminar defectos en procesos de producción y para desarrollar planes de mantenimiento en equipos. Con el advenimiento de la Industria 4.0, las empresas tienden a utilizar nuevas tecnologías en sus procesos productivos con el fin de que las instalaciones sean capaces de autogestionarse para utilizar los recursos de forma mucho más eficiente. Pareciera que, en este nuevo entorno, las metodologías tradicionales como el AMEF ya no resultan útiles. Nada más alejado de la realidad. En este artículo se ilustra cómo el AMEF, realizado de la forma correcta, es un insumo esencial en las reglas lógicas y algoritmos utilizados en aplicaciones de “Machine Learning”.

2. Evolución del AMEF

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas es una metodología utilizada para identificar problemas potenciales (errores, defectos, fallas), sus causas y los efectos en un sistema o proceso, con la finalidad de priorizarlos, para facilitar la toma de decisiones relacionadas con la asignación de recursos destinados a la prevención de esos problemas y/o a la mitigación de sus consecuencias.

EL AMEF surge a finales de los años 40 en la industria militar, como respuesta a reiterados defec-

tos de fabricación en municiones. Para entonces se documentó el procedimiento MIL-P-1629, el cual funcionó y fue adoptado luego por las industrias nuclear y aeroespacial en los años 50.

Posteriormente, en los años 70, las fallas ocurridas en un modelo de automóvil de una de las mayores ensambladoras de vehículos de los Estados Unidos motivaron a que esta empresa implementara el AMEF en su proceso de diseño.

El resto de las ensambladoras y empresas agrupadas en la AIAG

(Automotive Industry Action Group) comenzaron a utilizar también el AMEF. Desde el año 1993 la utilización del AMEF en los procesos de diseño y construcción ha sido requisito de la norma QS-9000, posteriormente convertida a ISO/TS 16949, estándar de gestión de calidad para la industria automotriz reconocido internacionalmente.

Después de la industria automotriz, el AMEF se comenzó a utilizar en otras industrias y hoy son muchas las que lo emplean con diferentes enfoques o variantes.

3. Enfoques tradicionales del AMEF

Independientemente del tipo de industria, el AMEF se ha utilizado hasta ahora como una herramienta de análisis de riesgo enfocada en:

- i. Eliminar defectos durante el proceso de diseño o manufactura de un producto.
- ii. Evitar fallas o mitigar sus consecuencias en componentes / equipos / sistemas.

En el caso de eliminación de defectos durante un proceso de manufactura, las acciones recomendadas van dirigidas a mejoras en los procesos de fabricación o en la capacitación de los operarios de las máquinas. La Tabla 1 muestra una hoja de trabajo de AMEF de proceso orientado a evitar defectos en piezas fabricadas mediante inyección de plástico. En este caso, la acción recomendada está orientada a incluir elementos de medición y control (sensores y válvula limitadora de presión) para evitar el error humano.

Tabla 1. Hoja de trabajo típica de AMEF de proceso. Fuente: El autor.

Proceso / Función	Falla Potencial	Modo de Falla	Efecto	Control Prevención / Detección	Si	Oi	Di	NPRI	Acción Recomendada
Inyección de pieza	Acabado con rebabas	Presión excesiva	Retrabajo	Presión regulada por el operador e inspección visual de la falla	9	6	10	540	Instalar sensores y válvula limitadora de presión en la inyectora

Por otro lado, en el caso de evitar fallas o mitigar sus consecuencias en componentes, equipos y/o sistemas de un proceso productivo, las recomendaciones se refieren a tareas de mantenimiento proactivo (preventivo, predictivo, detección), rediseño o capacitación de operarios y/o mantenedores en la correcta operación y mantenimiento del equipo. La Tabla 2 muestra una hoja de trabajo típica de este tipo de AMEF.

Tabla 2. Hoja de trabajo típica de AMEF orientado a evitar fallas o mitigar sus consecuencias. Fuente: El autor.

Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto	Si	Clasificación	Causa	Oi	Método de detección	Di	NPRI	Sr	Or	Dr	NPRr	Acción
Bombear agua de alimentación al sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de flujo y presión requeridas	Bomba menos del caudal o presión requeridos	Holgura excesiva en Anillos de desgaste	Paro por alta temperatura del fluido enfriado	3	VO	Desgaste - Desgaste normal	1	Indicación local y en panel de control de bajo flujo/presión	1	3					Monitoreo diario de flujo y presión y análisis mensual de datos o en caso de detectar condiciones anormales, lo que ocurra primero
				3	IND	Inducida - Sólidos en exceso en el fluido causando desgaste prematuro	3	Indicación local y en panel de control de bajo flujo/presión	1	9					

En los dos casos descritos, se calcula el NPRi (Número de Prioridad de Riesgo inicial) para determinar la criticidad del modo de falla mediante el producto de los criterios de Severidad, Ocurrencia y Detección de la falla (Si, Oi y Di). EL NPRf (Número de Prioridad de Riesgo final) indica la criticidad del modo de falla después de implementar la acción de control. Por supuesto, para que la acción propuesta tenga sentido, el NPRf debe ser menor al NPRi.

Un aspecto importante del AMEF orientado a evitar fallas en o mitigar sus consecuencias es que se identifica la causa (o las causas, en caso de que sea más de una) de la aparición del modo de falla. Esta información será de vital importancia para el uso del AMEF en soluciones de Machine Learning.

4. Inteligencia Artificial y Machine Learning

La Inteligencia Artificial (IA) y el Machine Learning (ML) están muy relacionadas entre sí, pero no son lo mismo.

Dicho de forma muy sencilla, mientras que la Inteligencia Artificial implica que las máquinas pueden ejecutar órdenes de ma-

nera inteligente y realizar tareas adaptándose a diferentes situaciones, el Machine Learning es una rama de la IA que se basa en la creación de máquinas que procesan datos y que aprenden de ellos sin necesidad de una supervisión constante.

Los adelantos obtenidos en IA han sido en gran parte gracias al ML, ya que los investigadores han comprendido que es más eficiente enseñar a las computadoras a como aprender, que enseñarles cómo hacer cada tarea, proporcionándoles información para ello.

5. Principios del Machine Learning

Como ya se mencionó, el ML se basa en el aprendizaje mediante el procesamiento de datos, pero ¿de qué tipo de datos estamos hablando? La respuesta es: depende de la aplicación que se quiera dar al ML. En nuestro caso hablaremos de la aplicación de Machine Learning a procesos productivos. Cualquiera que sea el proceso productivo, las personas encargadas de la operación y mantenimiento de los activos que forman parte de ese proceso siempre tienen presentes las siguientes preguntas:

- ¿Cómo mejorar el desempeño de la planta, la disponibilidad y calidad?
- ¿Cómo optimizar costos de operación y mantenimiento?
- ¿Por qué se incrementaron los costos de operación recientemente?
- ¿Cómo reducir las interrupciones del proceso debido a fallas?
- ¿Cómo optimizar el uso de recursos?
- ¿Por qué hay indicadores fuera de los objetivos?
- ¿Cómo identificar y solucionar problemas de forma anticipada?

Para responder todas estas preguntas se requiere disponer de información, preferiblemente que dicha información sea “accionable”, es decir, que nos indique que hacer cuando se detecta un problema, o que por lo menos nos facilite la toma de decisiones.

Hasta ahora, este tipo de información la han generado los Ingenieros de Procesos, Calidad, Confiabilidad y otros, involucrados con la operación, mantenimiento y productividad de los activos. Sin embargo, la gran cantidad de datos que deben analizarse, las distintas fuentes de las que estos datos provienen y las limitantes en la cantidad de personas que se pueden asignar a realizar este tipo de tareas, hacen que se obtenga solo una fracción de la información que se podría obtener y que por tanto no se pueda alcanzar todo el potencial de

confiabilidad y rendimiento que poseen los procesos productivos.

Implementando soluciones de Machine Learning y Analítica avanzada se hace posible procesar una cantidad inmensa de datos y obtener “información accionable” orientada a mejorar la confiabilidad y rendimiento de los procesos.

Una adecuada solución de Machine Learning aplicada a los procesos productivos se enfoca en 3 aspectos principales: recolección, análisis y visualización de la información (Figura 1).

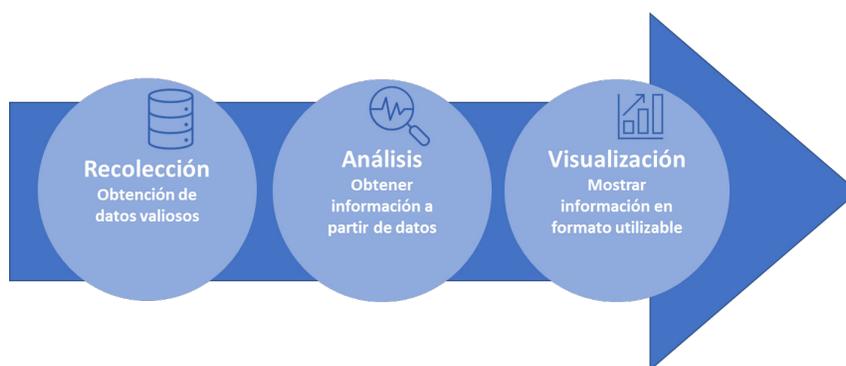


Figura 1. Áreas de enfoque de las soluciones de ML aplicada a procesos productivos.
Fuente: Emerson. Plantweb Optics Analytics Overview.

A continuación, una breve descripción de cada uno de estos aspectos:

5.1. Recolección

Mediante soluciones de Machine Learning se puede recolectar una gran cantidad de datos provenientes de diferentes fuentes, tales como:

- Visualizadores e historiadores de variables de operación y proceso en tiempo real.
- Sistemas de Control Distribuido (SCD).
- Controladores Lógicos Programables (PLC's).
- Sistemas de monitoreo en línea de vibración, corrosión, etc.
- Hojas de datos de equipos.
- Curvas y/o mapas de operación de equipos dinámicos.
- Diagramas de flujo de proceso.
- Hojas de Análisis de Modos y Efectos de Falla.

La selección de las fuentes de donde se toman los datos y los datos en sí mismos que se deben recolectar dependen de la información que se desea obtener y del uso que se le dará a la misma. Por ejemplo, si solo se quiere monitorear la condición de salud de un tren de compresión de gas formado por una turbina a gas y uno o más compresores centrífugos, seguramente será suficiente con obtener datos de vibración, presiones, flujos y temperaturas de succión y descarga. Sin embargo, si aparte de la salud, también se quiere monitorear el performance de la turbina y de los compresores, tendrá que obtenerse datos de, por ejemplo: % de apertura de válvula de control de surge, flujo, presión, temperatura y cromatografía del gas combustible.

5.2. Análisis

Después de obtener los datos requeridos de las fuentes seleccionadas, las soluciones de ML realizan el procesamiento y análisis de esos datos. Dicho procesamiento incluye el empleo de “algoritmos inteligentes” que utilizan, entre otras, las siguientes técnicas:

Limpieza de datos: los datos son procesados con el fin de detectar, corregir o eliminar registros imprecisos, incorrectos, incompletos, mal formateados o duplicados. El principal objetivo de este proceso es facilitar el movimiento de los datos y la transformación de estos.

Clustering: tiene como finalidad principal lograr el agrupamiento de conjuntos de objetos no etiquetados, para lograr construir subconjuntos de datos conocidos como Clusters. Este proceso desarrolla una acción fundamental que le permite a los algoritmos de aprendizaje automatizado entrenar y conocer de forma adecuada los datos con los que desarrollan sus actividades y ayuda a generar capacidades de análisis de forma rápida, en grandes volúmenes y con la menor cantidad de errores posibles.

Análisis de regresión: El análisis de regresión es una técnica de mediante la cual se calcula la relación estimada entre una variable dependiente y una o varias variables independientes. Con el análisis de regresión, es posible modelar la relación entre las variables elegidas, así como predecir valores basándose en el modelo creado.

Análisis secuencial: con este análisis se identifican los eventos y la secuencia de ellos que originan la ocurrencia de un estado o evento indeseado. Es de suma utilidad para identificar patrones de falla o de funcionamiento inadecuado.

Árbol de decisiones: es una vía de análisis que parte de la representación de manera gráfica de todos los sucesos que pueden derivar de la toma de una decisión y a su vez, de todos los sucesos que pueden derivar de cada uno de esos sucesos iniciales. Los árboles de decisión se emplean para la resolución de problemas ya que sirven para organizar los datos, estructurar los canales de análisis y, en última instancia, tomar la decisión con mayor probabilidad de acierto. Aplicado al Machine Learning, el árbol de decisión se utiliza para enseñar a las máquinas a tomar decisiones y por tanto, a resolver problemas de regresión o de clasificación. Como resultado, se obtienen modelos predictivos precisos y confiables.

5.3 Visualización

La información obtenida a partir del procesamiento y análisis de datos y la forma de presentarla dependerá del uso que se quiera hacer de la misma y hacia quien debe dirigirse.

La información obtenida puede estar relacionada con:

- La gestión de salud del activo.
- Detección de brechas en el desempeño.
- Predicción de fallas.
- Identificación de causa raíz de un problema.
- Acción a implementar antes de que ocurra la interrupción del proceso.

Por otro lado, las personas a quienes debe llegar la información pueden ser los operadores y/o mantenedores de la instalación, sus supervisores o los gerentes de cada organización.

Es por ello que la información se debe presentar en “tableros inteligentes” que vayan de lo general, mostrando por ejemplo, bajo rendimiento en un equipo, hasta lo particular, mostrando la causa de ese bajo rendimiento y las “acciones prescriptivas” que deben implementarse para corregir las desviaciones detectadas.

La Figura 2 ilustra un tablero inteligente en el cual se alerta sobre un problema de rendimiento en un compresor centrífugo, mostrando además la relación entre la eficiencia politrópica esperada y la real, la causa del bajo rendimiento y la acción prescriptiva recomendada.

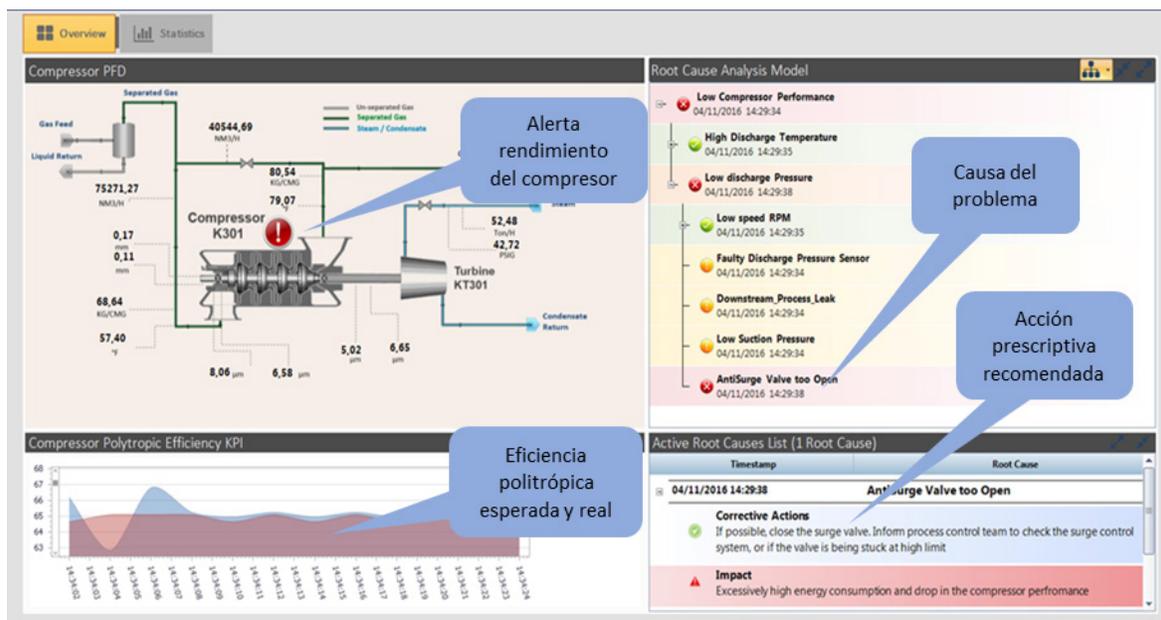


Figura 2. Ejemplo de tablero inteligente.
Fuente: Emerson. Plantweb Optics Analytics Overview.

6. AMEF aplicado a Machine Learning

En la sección 4.1 se mencionó al Análisis de Modos y Efectos de Falla como una de las fuentes de recolección de datos utilizada en aplicaciones de Machine Learning. Manteniéndonos enfocados en el AMEF dirigido a evitar fallas de componentes, equipos y/o sistemas, este tipo de análisis, realizado de la manera correcta, servirá de insumo para los algoritmos inteligentes encargados de identificar la causa de una falla y las acciones prescriptivas recomendadas. Entonces, ¿Cuál es la manera correcta de realizar un AMEF que servirá de insumo a estos algoritmos inteligentes? ¿Cómo luciría la hoja de trabajo de AMEF en estos casos? Habría que darle unos “retosques” a la hoja mostrada en la Figura 1. A continuación, hablaremos de dichos “retosques”.

En primer lugar, debemos dar más detalles sobre los efectos de la falla. En la Figura 1, el efecto identificado es el efecto final, o efecto en el proceso. Es el evento que no se quiere que ocurra: “Paro por alta temperatura del fluido enfriado”. Para que el algoritmo inteligente pueda correlacionar variables e identificar patrones de falla, debemos darle entonces datos de variables. Algo que ayudaría mucho es identificar como se entera el operador de que está ocurriendo la falla, cual es el efecto local o inmediato que se logra detectar y cual es el efecto en un próximo nivel antes de que se produzca el efecto final que sería el paro por alta temperatura del fluido. En nuestro caso, el efecto local sería una indicación de bajo flujo de descarga. Un efecto en el próximo nivel sería el aumento en la

temperatura del fluido que se está enfriando y el efecto final, el paro por alta temperatura de ese fluido.

Obviamente, en todos estos casos debe indicarse el valor de las variables de flujo y temperatura y sus unidades, de manera que el algoritmo identifique qué es “bajo”, qué es “alto” y qué es “normal”. De esta forma, cuando el algoritmo confirme disminución en la presión de descarga de la bomba, combinado solamente con la alta temperatura del fluido enfriado, identificará como causa de la falla el desgaste interno de la bomba (desgaste normal). Sin embargo, si las mismas dos condiciones anteriores vienen acompañadas de disminución en la presión diferencial del filtro de succión, entonces la causa identificada será el exceso de sólidos en el fluido.

Por otro lado, las acciones recomendadas también requerirán cambios. Volviendo a la Figura 1, las acciones recomendadas requieren el monitoreo de variables de flujo y presión de descarga de la bomba, así como presión diferencial en el filtro de succión. Pero resulta que si se tiene trabajando una solución de Machine Learning, ese monitoreo de variables y la correlación entre ellas para identificar la causa de la falla ya lo está haciendo el algoritmo inteligente de Machine Learning. Lo que se requiere entonces es indicar que hacer después de que se identifica la causa de la falla. En nuestro caso, si la causa de falla identificada es el desgaste normal de la bomba, la acción

requerida será, por ejemplo, programar paro de la bomba para realizar remplazo de partes internas. Incluso, si el algoritmo cuenta con suficientes datos podría indicar con cuanto tiempo se cuenta antes de que el desgaste interno origine un flujo de descarga inaceptable para el proceso. Pero si la causa identificada fuese exceso de sólidos en el fluido bombeado, la acción requerida pudiera ser remplazo del filtro o elemento filtrante ubicado en la succión de la bomba. En ambos casos, la solución de Machine Learning podría crear también un “aviso de avería” y enviarlo al departamento de planificación de mantenimiento para que se elabore la respectiva orden de trabajo.

7. Conclusiones

Adicionalmente a las aplicaciones que tradicionalmente ha tenido el AMEF, ahora también, realizado de la manera correcta, puede utilizarse como fuente de información para los algoritmos inteligentes de Machine Learning en procesos productivos para identificar causas de falla y las acciones prescriptivas recomendadas.

Los principales cambios por efectuar en un AMEF tradicional orientado a evitar fallas para que sea de utilidad a los algoritmos inteligentes utilizados en Machine Learning consisten en:

- i. Identificar varios niveles de efecto de falla (efecto local, efecto en el próximo nivel y efecto final). Dichos efectos deben estar relacionados con variables (temperatura, presión, flujo, etc.) y estas a su vez deben ser expresadas en magnitud y unidad de medida.
- ii. Indicar las tareas prescriptivas dirigidas a evitar que ocurra la falla funcional del sistema.

En general, las soluciones de Machine Learning aplicadas a procesos productivos contribuyen a que los sistemas sean capaces de autogestionarse para utilizar los recursos de forma mucho más eficiente.

8. Referencias

1. Judith Hurwitz / Daniel Kirsch. Machine Learning for dummies. IBM Limited Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2018.
2. Emerson Process Management. Plant Web Optics Analytics Overview. 2020.

BUREAU VERITAS

ANÁLISIS DE ACEITE

NUESTROS LABORATORIOS:

Los Angeles, CA
3401 Jack Northrop Avenue
Hawthorne, CA 90250
Tel: +1 800-248-7778

Houston, TX
12715 Royal Drive
Stafford, TX 77477
Tel: +1 800-248-7778

Chicago, IL
2450 Hassell Road
Hoffman Estates, IL 60169
Tel: +1 800-424-0099

Atlanta, GA
3385 Martin Farm Road
Suwanee, GA 30024
Tel: +1 800-241-6315

CONTACTO:

Jorge Alarcon,
Global Technical Manager OCM
jorge.alarcon@bureauveritas.com
www.oil-testing.com

ANÁLISIS DE ACEITE | ANÁLISIS DE REFRIGERANTE
ANÁLISIS DE COMBUSTIBLE | ANÁLISIS DE GRASAS
ANÁLISIS DE FLUIDOS DE CORTE | ANÁLISIS DE
FLUIDOS DE SISTEMAS HVAC | ANÁLISIS DE ACEITE
PARA TRANSFORMADORES

La confiabilidad de las máquinas móviles e industriales comienza con un programa continuo de análisis de aceite. La red mundial de laboratorios de última generación de Bureau Veritas proporciona resultados precisos y fiables en los que puede basar su programa de mantenimiento predictivo. Contacte con nosotros.

LOAMSSM - Sistema de gestión de análisis de aceite lubricante. Nunca ha sido más fácil para los gestores de equipos y el personal de mantenimiento optimizar la productividad utilizando datos de análisis de aceite usado en tiempo real.



BUREAU
VERITAS



ENTREVISTA

José Contreras

¿Quién es José Contreras y a qué se dedica?

Soy venezolano, actualmente resido en Buenos Aires Argentina. Me gradué de ingeniero hace mucho tiempo y comencé a trabajar en el área industrial y al mismo tiempo como docente en una Universidad venezolana, desde que comencé mi vida profesional he ejercido simultáneamente la docencia universitaria conjuntamente con la actividad industrial. También tuve una gran experiencia empresarial con mi propia empresa dedicada a la fabricación de artículos plásticos y metálicos. En los últimos 20 años me he dedicado exclusivamente a la investigación sobre la gestión del mantenimiento y la gestión de activos, fundamentalmente he investigado temas relacionados con la eficiencia de la gestión del mantenimiento. Actualmente me dedico exclusivamente a la consultoría y capacitación en estos temas.



¿Puedes contarnos un poco de qué tratan los libros que has escrito?

Hasta la fecha he publicado 3 libros, los mencionaré por orden de aparición:

- El primer libro tiene que ver con indicadores para la gestión del mantenimiento, se titula “Sistemas de Medición del Desempeño en Mantenimiento Basados en Indicadores de Gestión”. Este libro se originó después de que preparara el curso relacionado con el tema, a partir del requerimiento de una empresa en España que me solicitó que redactara todos los documentos relacionados con las diapositivas y después de un arduo trabajo me di cuenta de que tenía preparado todo el material para producir un libro. Esto me motivó a continuar con la publicación de otros libros.
- He dictado otros cursos, como por ejemplo el de “Inventarios para Mantenimiento”, hecho que me inspiró para abordar el tema de “Gestión y Optimización de Inventarios para Mantenimiento”, que fue el título de mi segundo libro. Particularmente este libro lo aprecio mucho porque es un tema con muy poca información en nuestro idioma y lo he preparado con un enfoque exclusivamente dedicado al tratamiento particular que se le debe dar a los inventarios de mantenimiento, que difiere considerablemente al de otros inventarios. Considero que esta es la razón de su gran aceptación.
- Recientemente publiqué el tercer libro, el cual compete a todo profesional del mantenimiento a nivel industrial, se titula “Planificación, Programación y Costos del Mantenimiento”.



Estos son los 3 libros que he escrito hasta la fecha y haré lo posible de seguir produciendo información de valor para los interesados.

¿Puedes describir detalladamente los temas que se tratan en el libro “Planificación, Programación y Costos del Mantenimiento”?

Este libro fundamentalmente se centra en la planificación y programación del trabajo en mantenimiento. Cuando hablamos del trabajo, tenemos 2 tipos:

- El trabajo rutinario: mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en condición y el mantenimiento correctivo.
- El trabajo de mantenimiento por proyectos, que consiste en ejecutar actividades de mantenimiento pero que deben ser planificadas y programadas como un proyecto. Este es el caso del mantenimiento mayor y las paradas de planta.

El libro se centra básicamente en las herramientas, métodos, técnicas apropiadas para planificar y programar el trabajo rutinario correctamente. Este es el trabajo que debe ser preparado y ejecutado semanalmente. También se le dedica un capítulo especial y extenso a la planificación y programación del trabajo no rutinario, el cual se hace por proyectos como, por ejemplo: paradas de plantas, mantenimientos mayores, overhaul. También se le dedica un capítulo importante al tema de los costos de

mantenimiento. El último capítulo se denomina “costos y presupuestos del mantenimiento”, es bastante extenso e interesante, ya que permite tener una visión clara sobre cómo entender los distintos costos del mantenimiento y cómo abordar el tema del presupuesto anual del mismo. Entre otros temas, el libro comienza con un modelo general de gestión del mantenimiento, trata lo que es la estructura organizacional de los departamentos de mantenimiento y después se procede a describir en qué consiste un sistema de indicadores para evaluar el desempeño en mantenimiento tomado de mi libro anterior, pero se enfoca básicamente en, tal vez la columna vertebral de este proceso, que es la gestión semanal del trabajo. Posteriormente abarca la planificación como proceso, la priorización de las órdenes de trabajo, el dimensionamiento de la plantilla, algunos temas básicos relacionados con la planificación de materiales, va cerrando con la programación propiamente dicha, que consiste en la elaboración del calendario semanal de trabajo, y finalmente revisa los temas, como ya fue indicado, de las paradas de planta, los costos y el presupuesto de mantenimiento. También incluye un tema, que hace una revisión rápida de lo que es un sistema de información para la gestión del mantenimiento, los famosos CMMS.

¿Cómo se puede adquirir y en qué formato está disponible el libro de “Planificación, Programación y Costos del Mantenimiento”?

Este libro, mercadotécnicamente hablando, en una primera fase se va a distribuir directamente desde Buenos Aires, sería su lanzamiento. En el curso “Planificación y Programación” dado a través de Predictiva21 se va a ofrecer la posibilidad de enviárselo directamente a los participantes. Por ahora, en esta primera fase del 2021, el lanzamiento es una edición limitada que estaré distribuyendo directamente y los interesados me pueden contactar con toda confianza que con gusto los atenderé.



José Contreras

GLOBAL CERTIFIED INSTRUCTOR en ASME (The American Society of Mechanical Engineers).

DIRECTOR en

mantenimientoeficiente.com

jocomarquez@yahoo.com



Optimizando la planificación del mantenimiento de sus activos y la medición de productividad mediante **tecnologías de IoT en Industria 4.0**





Ing. Guillermo Riva

Ingeniero en Electrónica y Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Socio fundador y representante de INSUS Ingeniería Sustentable SAS, Consultor IIoT de CONSUMAN (Argentina).

griva@insus.com.ar



Cra. Gisela L. Ledesma

Contadora Pública Especialista en Gestión de Tecnologías Innovadoras. Socia fundadora de INSUS Ingeniería Sustentable SAS, Consultora de IIoT de CONSUMAN (Argentina).

giseledesma@insus.com.ar



Resumen: Aprovechar las nuevas tecnologías existentes en el mercado como es la tecnología IIoT para la Industria 4.0, es indispensable y clave para contar con información en tiempo real del estado de los activos y de la productividad de los procesos industriales, tanto para asistir a la toma de decisiones como para hacer un uso más eficiente de los recursos. Conocer a tiempo si un activo está siendo bien utilizado, el tiempo de uso, si hay parámetros fuera del rango normal de funcionamiento, etc, permite detectar problemas que pueden ser solucionados de forma planificada e inmediata, evitando detenciones imprevistas de la línea de producción, con las consecuencias que ello trae. El encontrar un equilibrio entre un uso más eficiente de los equipos de producción para optimizar la producción no es una tarea sencilla, y se requiere para ello de contar con información precisa de todos los procesos involucrados. Para ello la obtención de datos de forma automática es de vital importancia para mejorar los procesos de mantenimiento y producción.

Si se agrega una dimensión extra a la planificación de mantenimiento de los activos, es decir, incorporar el sentido de ciertos parámetros relevantes, se pueden detectar problemas con anticipación a la fecha de control de mantenimiento. Esto no solo permite obtener información de los activos para optimizar las tareas de mantenimiento, sino que también posibilita la determinación de indicadores de productividad. El gran avance de la electrónica, los sistemas de computación y comunicaciones ocurrido en los últimos años posibilita recopilar grandes volúmenes de datos de múltiples fuentes de datos de una máquina, analizarlos buscando interrelaciones entre los mismos a fin de detectar potenciales eventos que no son directamente determinados mediante la medición de un parámetro físico único. Un ejemplo típico de ello es el monitoreo de vibración, de nivel de ruido, de consumo eléctrico y de temperatura de un motor industrial.

INSUS Ingeniería Sustentable, un proyecto de tecnología de IoT (Industrial Internet of Things) para Industria 4.0 integrado a CONSUMAN, desarrolla productos y servicios que

permiten mediante las últimas tecnologías mejorar las tareas de mantenimiento y asistir a la toma de decisiones para incrementar la productividad. Los sistemas de monitoreo desarrollados son adaptables a diferentes aplicaciones, y permiten mediante sensores y actuadores interactuar con el mundo físico y obtener información para optimizar la toma de decisiones y hacer un uso más eficiente de los recursos. Estos sistemas están formados por estaciones de telemetría con diferentes interfaces de comunicación tanto inalámbricas (WiFi, LoRa, Sigfox, 2G, 3G, 4G, LTE-M, NB-IoT) como cableadas (Ethernet, Fibra Óptica) (Figura 1). Los datos obtenidos por los sensores son enviados por el sistema a un servidor Web en el cual se realiza el procesamiento de los datos, y la visualización de la información, para que los responsables de las empresas puedan conocer en tiempo real el estado de sus activos y de su producción para asistirlos en una mejor toma de decisiones. Este acceso se realiza mediante una PC o Smartphone a través de una página Web con usuario y contraseña.

WiFi, GSM, LTE, LoRa

Sistema INSUS



Figura 1. Arquitectura del sistema de monitoreo y control de activos. Fuente: Los autores.

El sistema es totalmente configurable y permite la conexión y manejo de cualquier tipo de sensor y actuador, según el parámetro de interés a medir. Se puede instalar en el activo que se desea monitorear de forma independiente, sin interactuar con el sistema de control electrónico de la máquina. En la Figura 2 se muestran los módulos de telemetría y de manejo de sensores.

El sistema permite generar alarmas y notificaciones via correo electrónico o mensaje de texto (SMS) cuando los valores de los datos sensados superan un umbral predefinido. Los datos obtenidos también pueden ser descargados en formato CSV para su análisis. En la actualidad se trabaja en la incorporación de mecanismos de inteligencia artificial en los equipos de monitoreo, como es el aprendizaje de máquina (machine learning), a fin de que los mismos puedan aprender y tomar decisiones específicas de forma autónoma.

Los datos obtenidos también pueden ser descargados en formato CSV para su análisis. En la actualidad se trabaja en la incorporación de mecanismos de inteligencia artificial en los equipos de monitoreo, como es el aprendizaje de máquina (machine learning), a fin de que los mismos puedan aprender y tomar decisiones específicas de forma autónoma.



Figura 2. Módulo de telemetría y estación con módulos para el manejo de sensores. Fuente: Los autores.

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de sistema de monitoreo de productividad con reporte automático de eventos de parada. El mismo brinda información de tiempos de producción (horas y porcentajes de funcionamiento y de detención de la máquina) indicados por barras azules, y registro de eventos de detención de la máquina indicados por espacios blancos (Figura 4). Cada uno de los eventos de parada son identificados y reportados.



Figura 3. Sistema de monitoreo de estado de funcionamiento y productividad de una máquina industrial. Equipo de telemetría a la izquierda de la foto. Fuente: Los autores.

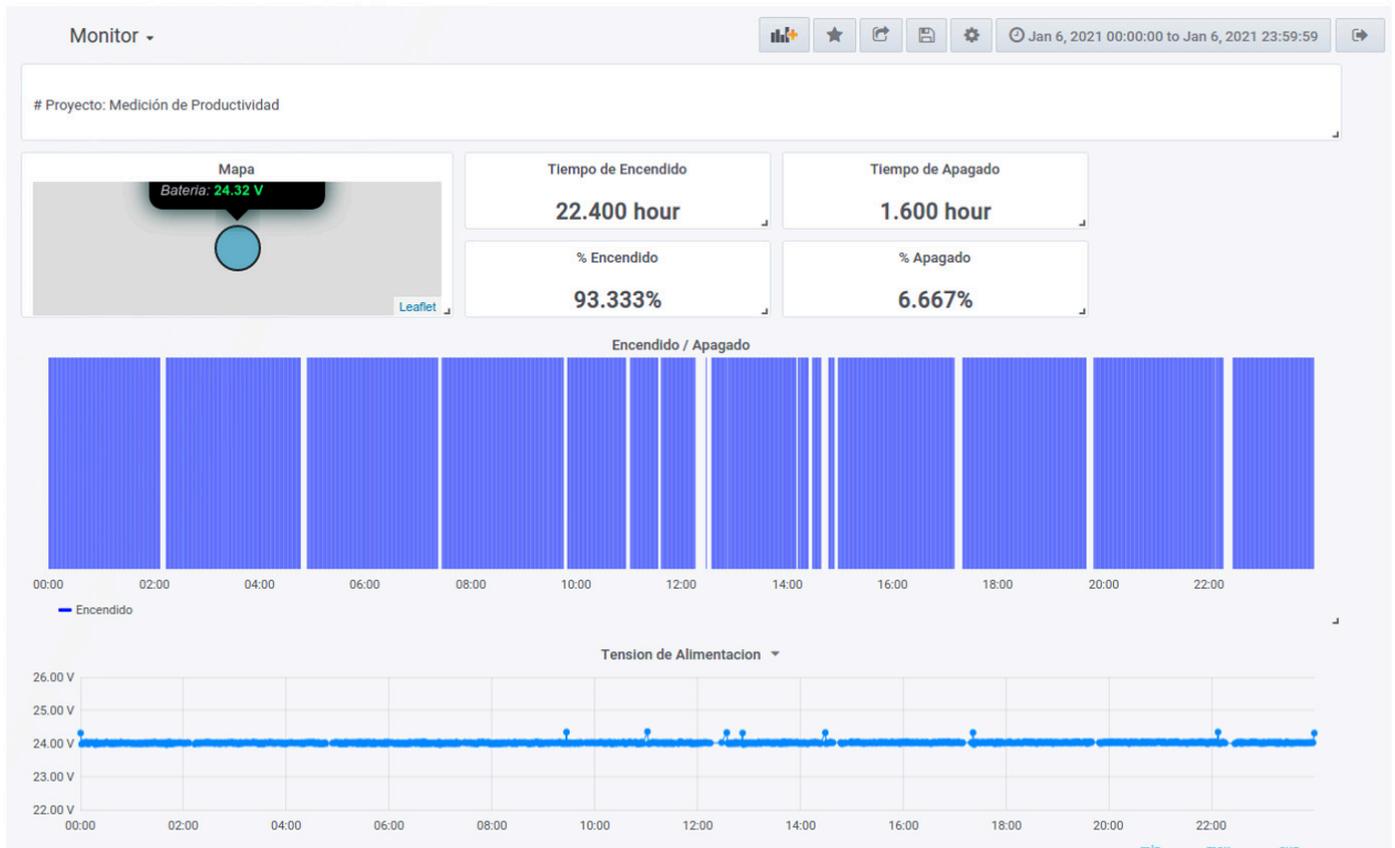


Figura 4. Visualización de información de productividad de máquina en función del tiempo de operación. Fuente: Los autores.

En la Figura 5 se muestra un sistema para medición de energía eléctrica. Con el mismo se realizan diferentes tipos de análisis que permiten tomar decisiones sobre un mejor uso del recurso. En la Figura 4 se muestran algunas mediciones obtenidas, el registro de eventos relevantes y la detección temprana de potenciales problemas.

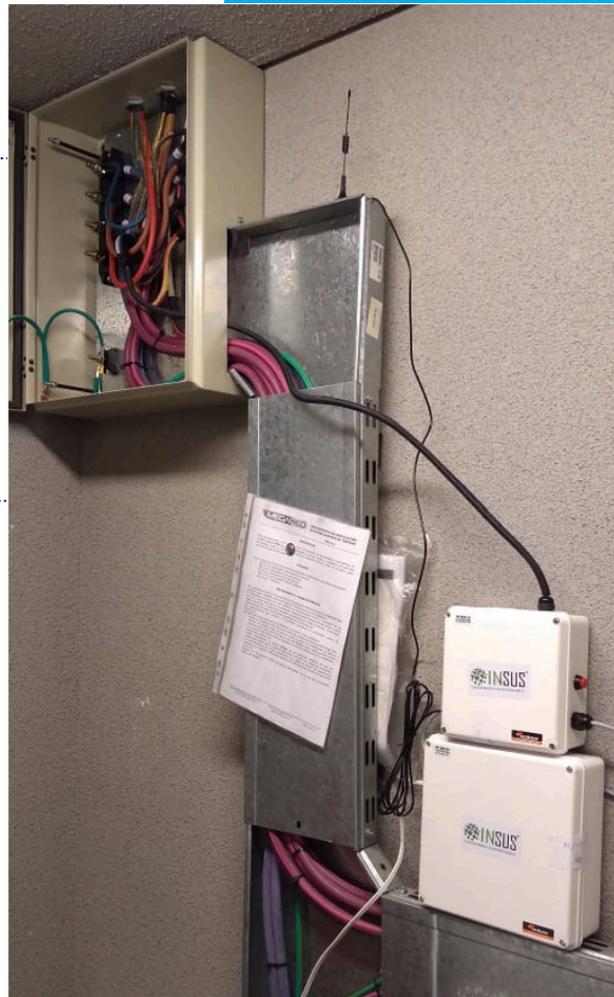


Figura 5. Sistema de monitoreo y análisis de energía eléctrica. Fuente: El autor.

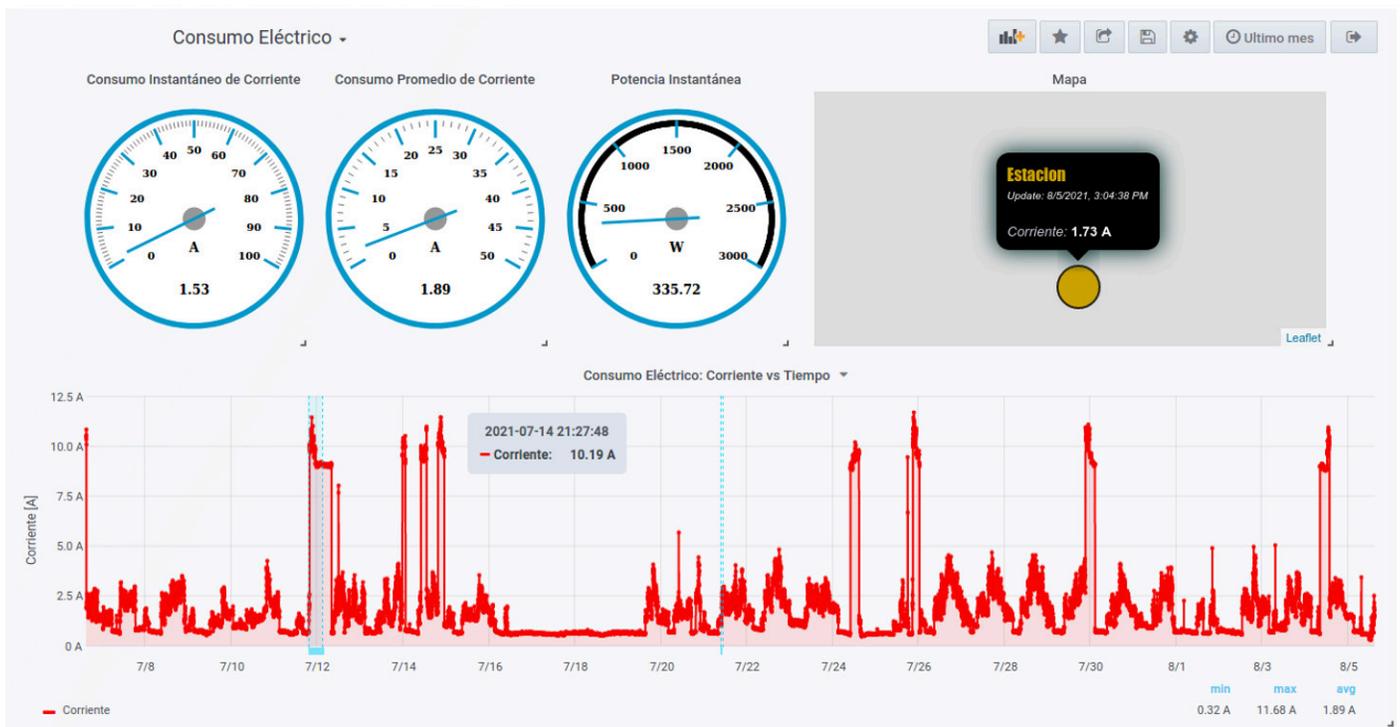


Figura 6. Visualización de datos de consumo eléctrico de sistema de un sistema de calefacción. Fuente: El autor.

Otro tipo de aplicación es el monitoreo y control del correcto funcionamiento de máquinas de producción mediante la incorporación de sensores de vibración en diferentes puntos críticos de la misma (Figura 7). Mediante la información obtenida se pueden detectar posibles problemas de funcionamiento que pueden poner en riesgo a la máquina.

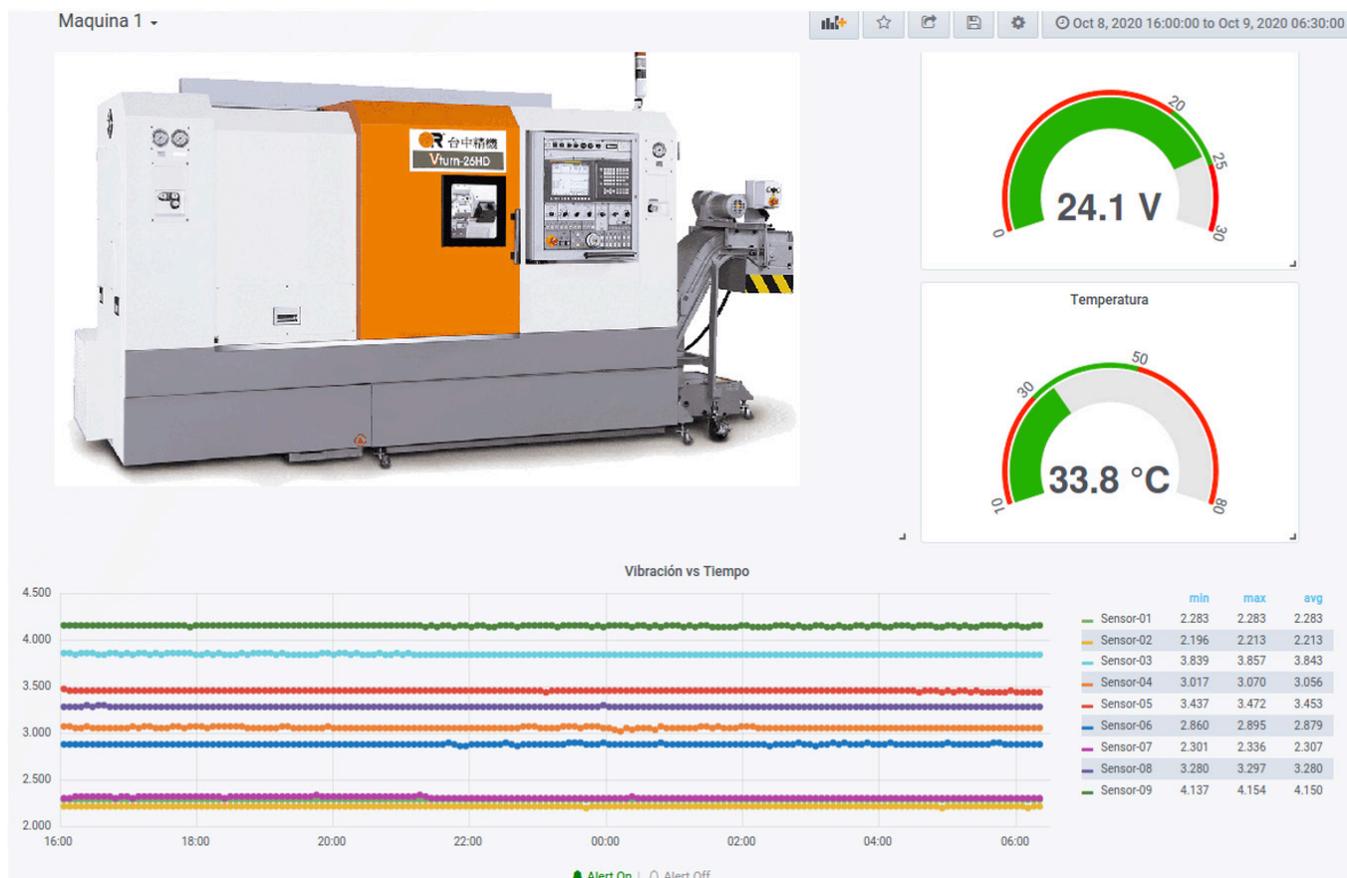


Figura 7. Monitoreo y análisis de vibraciones en máquinas. Fuente: El autor.

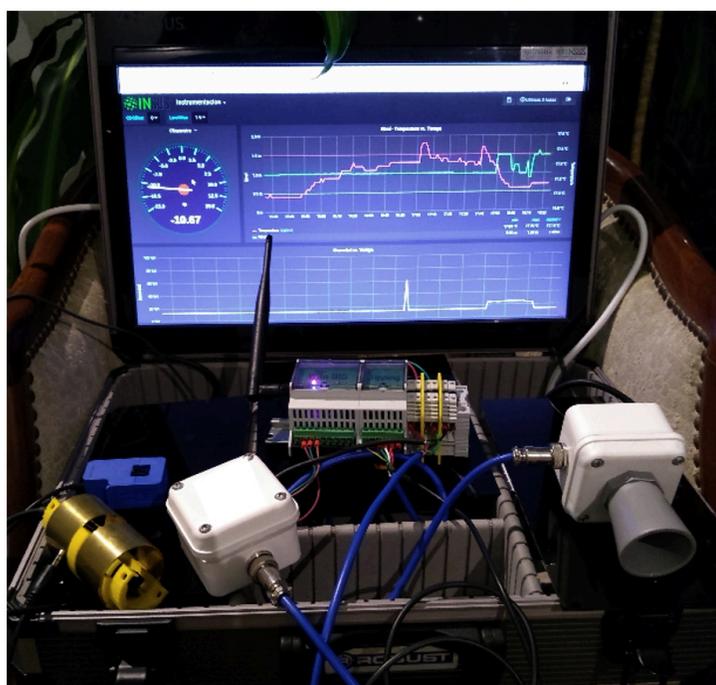


Figura 8. Kit interactivo de demostración del sistema. Fuente: Los autores.

INSUS CONSUMAN ya cuenta con varios casos de éxito en diferentes industrias, y posee la capacidad de adaptar sus desarrollos a la necesidad particular de cada cliente debido a la arquitectura modular y reconfigurable utilizada (Figura 8).

Ejemplos de aplicaciones desarrolladas:

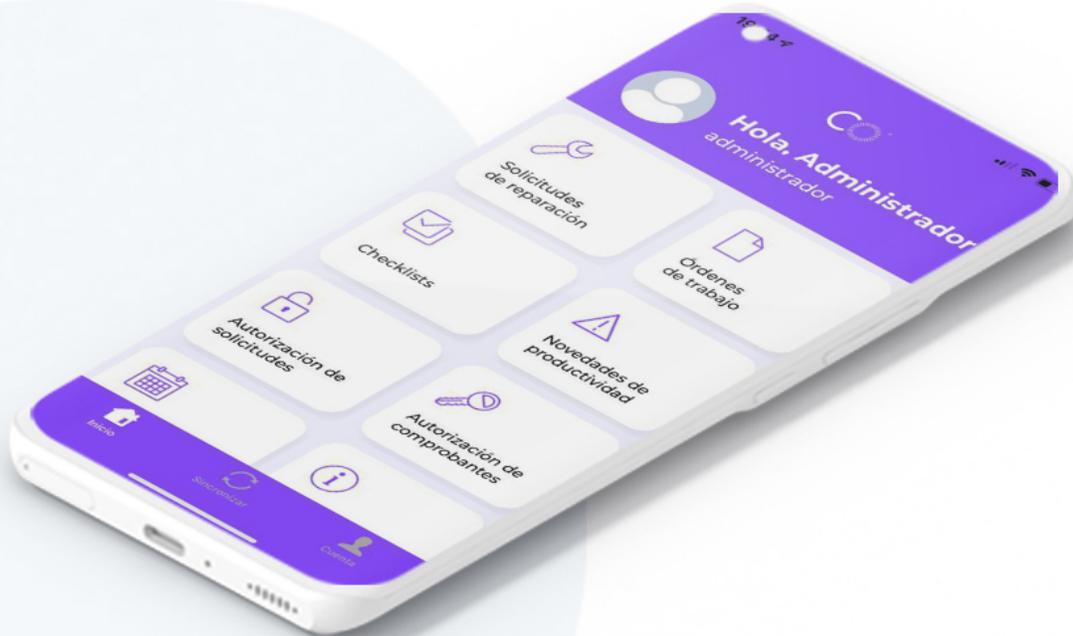
- Monitoreo del estado de funcionamiento de activos con análisis predictivo de fallas.
- Monitoreo y determinación de la productividad.
- Monitoreo de caudales y niveles en tanques.
- Medición de consumo eléctrico y optimización del uso de la energía.
- Monitoreo y análisis de vibración de activos.
- Monitoreo de niveles acústicos.
- Monitoreo y análisis de calidad de aire.

El propósito de INSUS es “Monitorear los recursos naturales y productivos del mundo para un futuro más sustentable”.

¿Necesitas optimizar el área de mantenimiento?

Consuman es la solución N°1 para planificar, hacer seguimiento y optimizar la gestión de activos de tu empresa.

100 % en la nube, fácil de usar y rápida de implementar.



Con Consuman podrás:

Recopilar, analizar y actuar sobre los datos de mantenimiento con informes bajo demanda.

Contar con herramientas móviles para todos los usuarios.

Gestionar presupuestos, compras y stock.

**Tengas la empresa que tengas,
hacemos que todo funcione.**

Integraciones y desarrollos específicos para adaptarnos a tu organización.

Hablemos:
ventas@consuman.com
www.consuman.com

Brau Clemenza

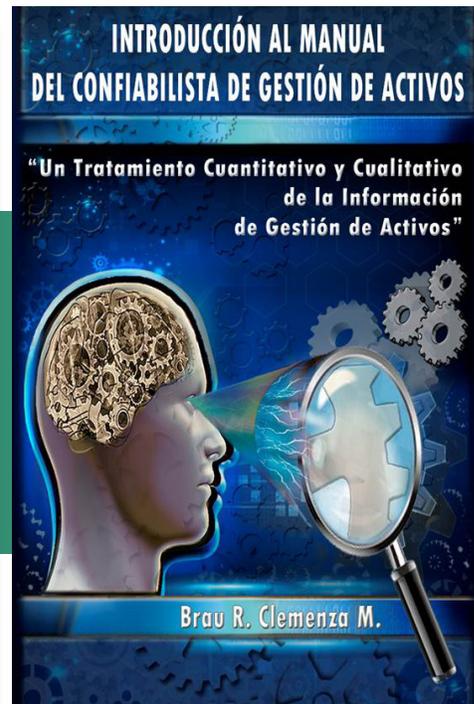
ENTREVISTA





¿Quién es Brau Clemenza y a qué se dedica?

Brau es un ingeniero industrial titulado a principios del año 1986, con una maestría en Gerencia en Mantenimiento en el año 1994 y una especialización en Perfeccionamiento Gerencial y Fortalecimiento Docente. En el año 1987/1988 se me asignó una gran responsabilidad como coordinador de un proyecto de elaboración de FMECA(s), FTA(s) e inventario de activos tanto para equipos estáticos, rotativos e instrumentación de todas las plantas de los dos complejos petroquímicos más grandes de Venezuela de PEQUIVEN (El Tablazo y Morón). Mi trayectoria abarca 35 años por el mundo de la logística integral, materiales y en mayor profundidad la parte de mantenimiento. Me desempeñé como docente de postgrado, articulista y consultor para una firma de ingeniería que realizaba trabajos en empresas químicas, petroquímicas, pasando por la industria de laminación, minería, oro, hierro, briquetas, material rodante, transporte superficial e instituciones públicas.



¿Cómo se titulan tus libros?

Como escritor después de recorrer tantas plantas formando parte del equipo de consultoría, decidí escribir un primer libro en el año 2011 titulado “Cómo Desarrollar e Implantar un Sistema de Mantenimiento”, porque me di cuenta de que lo que funciona para una planta posiblemente no funciona para otra. Las definiciones que se aplican para un proceso posiblemente no funcionen para otro; debido a que en el mantenimiento hay muchas verdades relativas y pocas absolutas, y muchas de las relativas se ha querido convertirlas en absolutas, haciendo ver que lo que se aplica por ejemplo para Oil&Gas podemos aplicarlo para material rodante, alimentos u hotelería. Así mismo, en este libro hay un aparte dedicado a un tema muy importante y poco precisado como lo es el “**Diseño de las Cláusulas Contractuales de Adquisición de Equipos**”, debido a que, a mi manera de ver, “**El Pecado Original**” de una mala gestión de mantenimiento y en mayor grado de activos radica en no contemplar una gran cantidad de información al momento de la negociación de la adquisición del activo, que nos va a servir posteriormente a contribuir para operar y mantener un activo adecuadamente. Porqué digo “**contribuir**” porque en el camino durante la etapa de explotación (operar y mantener) podemos incurrir en malas estrategias y decisiones inadecuadas que impactarán sobre el negocio o rentabilidad de la empresa. Igualmente trato sobre temas de inventarios, funciones, criticidades, planificación y programación, paradas de plantas, indicadores y

un aspecto muy importante que es el factor humano como una contribución a la filosofía de mantenimiento.

Con el segundo libro me ocurrió algo significativo, y era que éste iba a ser mi primer libro, debido a que tenía mucha información de datos e información de plantas que había recopilado durante tantos años, y entendí que era preferible primeramente tratar el tema de la Filosofía de mantenimiento como proceso en el buen sentido de la palabra y después ir a un escenario un poco más complicado como es la captura, procesamiento, análisis y presentación de la información de la gestión, que aunque son dos caras de la misma moneda (filosofía y datos), son parte integral de la misma moneda y no podemos separarlas. Este segundo libro está orientado más a la parte estadística. Siempre he dicho que la confiabilidad integral está compuesta de 3 elementos: la confiabilidad operacional, la confiabilidad humana, y la confiabilidad de la información (la confiabilidad de los datos), y de esto trata este libro, mucha estadística explicada de manera sencilla, debido a que este tema es muy amplio y es la razón por la cual lo titulé: “Introducción al Manual del Confiabilista. Un Tratamiento Cuantitativo y Cualitativo de la información de Gestión de Activos”. Se contemplan los atributos de un confiabilista, manejo de los datos, probabilidades, las distribuciones principales, binomial, normal, log normal y Poisson, y nuestra estrella Weibull, ábaco de decisiones. También abarca el parámetro de disponibilidad,

el cual hay que verlo con mucho cuidado, porque nosotros podemos conseguir disponibilidades con largo tiempo de operación, largos tiempos para reparar, cortos tiempos de operación, cortos tiempos para reparar, y sin embargo la disponibilidad es la misma, aunque el impacto es diferente. Esto es parte de la relatividad del mantenimiento.

En este libro también hay un aparte dedicado al Overall Effectiveness Equipment o Efectividad total de los Equipos (OEE), del mantenimiento productivo total, y de cómo podemos hacer más “fuerte” este indicador, debido que, así como está, posiblemente estemos tomado decisiones imprecisas. La razón es que podemos conseguir el mismo valor del indicador si sube la disponibilidad y baja la calidad o sube la calidad y baja la disponibilidad, y sin embargo el valor del indicador es el mismo o muy cercanos, pero los impactos son diferentes. También se presentan las medidas de tendencia central, la moda, la mediana, el promedio, porque hay un aspecto importante, por ejemplo: cuando hablamos a veces de los tiempos medios para reparar, tiempos medios de funcionamiento, sumamos los tiempos y dividimos entre el número de eventos, incluso cuando los datos pueden estar muy cercanos a un valor de tendencia central y sin embargo no es el promedio sino una moda. De igual manera, un cuidado muy importante hay que tener con la dispersión de los datos. Son este tipo de situaciones que cubrimos también en este segundo libro.

¿Si tuvieras que decirnos cuál es la importancia que le ves a adquirir estos conocimientos?, ¿cuál sería?

Yo creo y ustedes compartirán conmigo esta afirmación de que en el mantenimiento la gente tiene que saber dónde está y para dónde va, y si nosotros no monitoreamos los datos sería muy difícil saberlo. Recordemos que los datos son el ADN de la gestión, y de acuerdo con su tratamiento trazamos estrategias acertadas y oportunas. Acá dejo una mis reflexiones: **“No se puede mantener lo que no se conoce y si se conoce hay que saber cómo hacerlo”**

Sabemos que introduces un nuevo indicador en tu libro, este indicador que tú llamas “indicador de calidad del servicio”, ¿a qué viene este nuevo indicador? y ¿en qué se fundamenta?

Hace más de 30 años cuando incursioné con el metro de Caracas y después con la antigua cadena Hilton en Venezuela, en la parte de hotelería, formé parte de algunos trabajos con la empresa de consultoría con la que trabajaba, y me preguntaba: ¿Cómo puedo medir la calidad del servicio de estas cosas, de estos sectores?, porque así como tenemos el OEE, yo decía entonces: “Bueno con este indicador no puedo medir calidad de servicio, porque son dos cosas muy diferentes”, por lo que durante la pandemia fui madurando esa idea en la que venía trabajando desde hace muchos años y logré desarrollar este indicador que se llama “Global Indicator of Prestige”, indicador que está registrado con mi nombre, y que trata de cómo medir la calidad de servicio para estos sectores, ya sea: material rodante (trenes y estaciones), transporte superficial (autobuses), hotelería, hospitales, pudiéndose aplicar a otros sectores de servicio.

Este indicador está compuesto de 3 factores que son:

- En el español el indicador se expresa con la siguiente fórmula:

IGP: Imagen x Confort x Seguridad™

- En el inglés el indicador se expresa con la siguiente fórmula:

GIP: Customer Service x Comfortability x (Safe&Security)™

Como podemos observar existen diferencias para los términos en español e inglés, debido a que, por ejemplo: la “imagen” sabemos que significa en español esta palabra. La imagen en las personas, imagen de una organización; pero, en inglés la palabra “imagen” significa algo que está colgado en una pared, estructura, etc. Esta es la razón por la cual no podemos utilizar este término en la formulación. Para el idioma inglés tenemos el término “Customer Service” que está relacionado con el servicio al cliente.

Igualmente, en nuestro idioma, el término seguridad engloba todo: seguridad a las personas, seguridad del ambiente, seguridad a las instalaciones, seguridad en la logística, pero en inglés tenemos dos: “Safety & Security” para englobar todo el aspecto de seguridad en toda su amplitud. De allí la diferencia del indicador entre ambas formulaciones. La nomenclatura™ significa (Trade Mark) una marca registrada bajo el nombre de Brau Clemenza. Observando cada uno de esos parámetros que contempla la fórmula del GIP, estos pueden tener una gran cantidad de variables a “CALIFICAR”: 5, 10, 20, o más; que posteriormente servirán para cuantificar el **Indicador de Prestigio Global**. Ahora bien, “de qué” depende la cantidad de variables para cada factor. Ésta depende de la magnitud de la organización y de la alta demanda de requerimientos de satisfacción. **Qué significa esto: que a mayor nivel de satisfacción mayor será la cantidad de variables a calificar.**



Brau Clemenza

Consultor, Docente, Articulista, Investigador.
Director de la firma de Ingeniería y Consultoría LOINPROC, C.A.

brclemenza@hotmail.com

www.sistemademantenimiento.com

Para hacer una comparación con lo dicho anteriormente para el caso del sector hotelería, no es igual el nivel de requerimiento de calidad para un hotel de cuatro o cinco estrellas que para un hotel de siete estrellas como el Burj Al Arab Jumeirah en Dubái, TownHouse Galleria en Milano, o en España el Jumeirah Port Soler Hotel. Si bien es cierto que esta categoría de siete estrellas no existe en su normativa, estos hoteles superan a los de cinco estrellas, razón por la que se le ha asignado esta categoría informalmente en internet. En consecuencia, sus exigencias de satisfacción son mucho mayores con relación a los otros hoteles de menor categoría.

Por otro lado, de igual manera, podemos calcular el Indicador Global de Prestigio (GIP) si nos referimos a material rodante (trenes y estaciones), donde las cantidades de variables a calificar son un poco menos que para el sector hotelería. Podemos observar que, por ejemplo: la Línea Roja (Red Line) o la Línea Azul (Blue Line) del Metro de Chicago, tendrán menor valor de las variables a calificar que la del MetroSur o la L10 de Madrid, o para ir más allá, con el tren de levitación magnética (Maglev). Por ejemplo, Si tomamos las variables “silenciosidad” o “Puntualidad”, con seguridad habrá una gran desviación entre estos valores de cualquiera de las líneas del Metro de Chicago con relación al Metrosur o la L10 de Madrid, debido a la antigüedad del primero, tanto en tecnología como en construcción, sus valores de las variables de calidad serán menores. Son todo este conjunto de características o variables que sumadas darán una posición de nivel de prestigio del elemento a cuantificar. Para el **Indicador Global de Prestigio** existe una tabla donde podemos cuantificar el valor del indicador, sea éste: excelente, bueno, regular, malo. Como hemos visto, el Indicador Global de Prestigio viene a llenar el vacío que hay en cuanto a la medición de Calidad de Servicio, tal como tenemos para medir el desempeño de una línea de producción o un equipo importante, con el **Overall Effectiveness Equipment (OEE)**.

Debido a la gran cantidad de variables a calificar para este indicador, en este último libro podrán encontrar un capítulo desarrollado sobre este nuevo indicador; sus bases de datos, solo para los sectores de trenes y hotelería; y lo más importante, su metodología de cálculo. Estas bases de datos se pueden ampliar para los demás sectores de servicios, tal como lo comentamos anteriormente.

¿Dónde pueden las personas encontrar tu libro?, ¿es físico o es digital?, ¿dónde se compra?

El formato físico de la segunda edición se puede conseguir en Bogotá y en Venezuela. La tercera edición del primer libro “Cómo Desarrollar e Implantar un Sistema de Mantenimiento” está digitalmente en AMAZON y en su plataforma Kindle. El segundo libro: “Introducción al Manual del Confiabilista. Un Tratamiento Cuantitativo y Cualitativo de la información de Gestión de Activos” solo de manera digital, igualmente en Amazon a un precio accesible de 9.99\$ ambos. Por otro lado, para más información está mi recién [canal de YouTube](#) donde encontrarán más de 30 videos sobre este amplio mundo del Mantenimiento. Igualmente, tenemos nuestra página WEB www.sistemademantenimiento.com de mi empresa LOINPROC, donde encontrarán más de 60 artículos relacionados con el tema.

Sin más, enormemente agradecido a **Predictiva21** por su consideración al referirme en esta prestigiosa revista.

$$\begin{array}{r} 42 \\ \times 24 \\ \hline 840 \\ 168 \\ \hline 1008 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 36 \\ \times 18 \\ \hline 360 \\ 288 \\ \hline 648 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 90 \\ \times 24 \\ \hline 1000 \\ 360 \\ \hline 560 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 72 \\ \times 14 \\ \hline 720 \\ 288 \\ \hline 1008 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 89 \\ \times 8 \\ \hline 756 \\ 108 \\ 23 \\ \hline 2160 \\ 324 \\ \hline 9144 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 123456 \\ \times 8 \\ \hline 8674920 \\ 467448 \\ \hline 9629568 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 64 \\ \times 15 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 122 \\ \times 6 \\ \hline 732 \\ \hline \end{array}$$

Optimizando el Mantenimiento:

métodos matemáticos y estadísticos: casos y tendencias

**Manoel Segadas**

Ingeniero Eléctrico, Universidad
Federal de Río de Janeiro.
M.Sc. Investigación Operativa,
Universidad de Stanford.

1. Una introducción necesaria: el crecimiento exponencial del entorno digital y sus datos

El matemático londinense Clive Humby creó una famosa frase: “El dado es el nuevo petróleo”. Esta expresión se generó a partir de 2 observaciones: en los últimos 10 años, las empresas de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones ocuparon 7 de los 10 primeros lugares de las empresas con mayor valor de mercado en el mundo, cuando hace 10 años solo habían 2. Y, con la existencia de una cantidad gigantesca de datos y la capacidad de procesarlos de forma inteligente para sustentar decisiones, en muchos casos a través de los algoritmos de Matemática y Estadística, como Inteligencia Artificial y Machine Learning, parece estar dando lugar a una nueva era de optimización de procesos, y la aparición de nuevos modelos de negocio que se ha denominado Transformación Digital o Industria 4.0.

El advenimiento de la Transformación Digital, o Industria 4.0, está optimizando procesos y creando disrupciones en los modelos operativos existentes. Pocas áreas parecen tan capaces de optimizarse tanto como la Gestión de Activos. La empresa canadiense OPEN TEXT publicó en 2018 el resultado de una encuesta sobre Transformación Digital realizada en todos los continentes, que abarcó a casi 200 ejecutivos, el 14% de los cuales son Miembros del Consejo de Administración de sus organizaciones. Entre las diversas preguntas, una fue: “¿Qué partes de la cadena de valor de petróleo y gas cree que se beneficiarán más de la transformación digital?” La respuesta fue (era posible señalar más de un área):

- Integridad de activos y mantenimiento: 58%
- Desarrollo de producción: 40%
- Perforación: 27%
- Refinerías: 19%
- Oleoductos: 13%
- Procesamiento de gas: 11%
- Transporte (cisternas y camiones): 9%
- Marketing de productos: 8%
- Almacenamiento: 6%
- Construcción: 6%
- Generación de energía: 5%
- Licuefacción: 5%
- Otros: 12%

Todas estas transformaciones se generaron a partir de algunos eventos en el área de Tecnologías de la Información:

- Exponencialidad en el crecimiento de la capacidad del procesador. Durante décadas los procesadores aumentan su velocidad exponencialmente y tienen costos decrecientes. Para citar ejemplos extremos, la primera computadora comercial, un UNIVAC, costó \$ 1.5M. Hoy en día existen computadoras con velocidades mucho más altas que las pioneras UNIVAC, y con precios mucho más bajos.
- La conectividad de los dispositivos móviles con otras personas y entidades está cada vez más extendida, proporcionando una mayor y más rápida colaboración, y con los recursos de Información de las empresas, permitiendo la creación de nuevos procesos de toma de decisión o aceleración de existentes.
- Parte de esta transformación también está provocada por la caída del precio de los sensores a menos de 1/3 en una década, provocando la viabilidad de soluciones que existen desde hace algún tiempo. Lo que diferencia el momento actual es que la disminución del costo de los sensores, sumado al aumento de la velocidad y la disminución del costo de los procesadores, posibilita su aplicación de manera más generalizada.

Esta enorme cantidad de operaciones será hecha posible gracias a procesadores más potentes y también al procesamiento en la nube, buscando la alternativa más confiable y rentable. A partir de este gigantesco aumento de datos, que proporciona una inmensa cantidad de información operativa en tiempo real, muchos se refieren a la transformación digital como una “transformación impulsada por datos”. Como Clive Humby preguntan: “¿Son los datos el nuevo petróleo?”

2. La evolución del software

Junto a la evolución del hardware está la del software. Al inicio de los procesadores, fueron capaces de realizar las cuatro operaciones matemáticas elementales, así como el cálculo de ecuaciones y algoritmos que, a través de fórmulas, utilizaban esas operaciones. Tomemos ahora, para ejemplificar la que es quizás la aplicación digital más popular del mundo, el automóvil autónomo:

Automatiza los procedimientos que realiza el conductor, como acelerar, frenar, mover el volante, encender lu-

ces y faros, señalar cambios de carril para otros vehículos, etc., desde señales de tráfico, contactos con coches u obstáculos cercanos, velocidad máxima de las rutas, etc. Estas circunstancias señalan reglas operativas en la mente del conductor, que no son operaciones matemáticas, ecuaciones o algoritmos. Podríamos llamarlas “reglas de negocio”. Actualmente, el software es capaz de reproducir estas “reglas de negocio” y, con la automatización, activar los mismos frenos, acelerar, mover volantes, etc., que el conductor simulado.

3. Dos ejemplos de uso de matemáticas y estadísticas en mantenimiento

3.1. Backlog y teoría de las colas

Uno de los indicadores más tradicionales en Mantenimiento es el backlog. Muestra el número de Órdenes de Mantenimiento que esperan ser ejecutadas en un momento dado. Sin entrar en el tema de las prioridades, el backlog es en realidad una lista de espera. Su uso principal es servir como indicador para medir el número de personas de mantenimiento. Como todos sabemos, el Gerente de Mantenimiento, en este tema, suele estar entre dos fuegos: los ejecutivos a los que reporta le dicen que tiene demasiada gente, mientras que los que le reportan le dicen que tiene muy poca gente.

En realidad, el backlog, en realidad, desde un punto de vista matemático, es acercado por una parte de la teoría llamada Teoría de las colas. Si hay muy pocas personas, es probable que la acumulación de trabajo sea demasiado alta y que incluso se produzcan pérdidas de ganancias. Si hay demasiada gente, habrá un costo inútil, que también puede ser elevado.

Las colas de espera se han estudiado desde

1905, cuando un ingeniero danés llamado Erlang estudió este proceso al estudiar dimensionamiento de la red telefónica de Copenhague. En resumen, cada problema de cola tiene 2 parámetros fundamentales: la tasa de llegadas en la cola (si no hay llegada de personas, vehículos o máquinas para reparar, no habrá cola); y el ritmo de las reparaciones (si no hay quien repare, o proporcione los medios para atender la cola, la cola tiende a infinito).

Hay un tercer indicador clave en la cola: el factor de utilización, que es la fracción de la tasa de llegada / tasa de servicio. Si esta fracción es mayor que 1, es decir, si la tasa de llegada es mayor que la del servicio, la cola tenderá a infinito. Un último dato muy relevante: tanto la tasa de llegada como la tasa de servicio son probabilísticas. Es decir, no todos los días llega la misma cantidad de servicios, ni se atienden las mismas cantidades de órdenes de mantenimiento. En mantenimiento, hay días mejores y peores. A continuación se muestra una curva genérica que muestra este fenómeno:

Correlação do tamanho da fila com o fator ρ (fator de utilização)

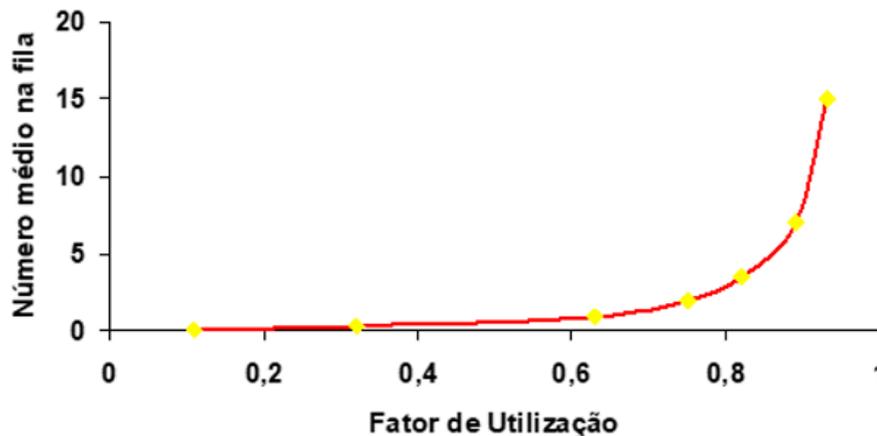


Figura 1. Correlación entre el tamaño de la cola y el factor P (factor de utilización).

Eje Y: Tamaño medio de la cola. Eje X: Factor de utilización.

Fuente: El autor.

Aunque la forma de esta curva varía según las distribuciones de llegadas y servicio, en general, cuando el factor de uso tiende a 1, esta curva tiende rápidamente al infinito. Cuando el factor de utilización es bajo (es decir, hay un exceso en el mantenimiento efectivo), el valor de la cola es demasiado pequeño o cero.

Hace unos 15 años, el Gerente de Mantenimiento de una empresa eléctrica en Brasil me ha contactado. Por razones contractuales, estoy obligado a mantener la confidencialidad del nombre de la compañía. En

ese momento la ANEEL (Agencia Reguladora de Electricidad en Brasil) tenía una nueva determinación de que, en caso de un fallo de un equipo, era obligatorio que el equipo de reparación saldría en promedio en 30 minutos. Y en la región de la capital del estado, la más grande de las regiones a las que asistió la empresa, éste tiempo de servicio fue de 1 hora y 15 minutos en promedio.

Creían en algo así como una “regla inversa de tres”: para reducir el tiempo a 1/3 sería necesario tener el triple del personal de mantenimiento.

Además de un enorme aumento en el costo, temían por la pérdida de calidad del gran número de profesionales que serían admitidos. Como conocía la forma de la curva anterior del Factor de Utilización, contesté que no creía que este aumento fuera necesario para triplicar el efectivo, tal vez crecería alrededor del 20%. Me contrataron para estudiar el problema. Para resumir, presento en el siguiente cuadro un resumen de la hoja de cálculo para la región de la Capital del Estado, en el período de 8 a 16 horas:

Ejemplo de dimensionamiento de personal en una compañía eléctrica

Equipos	Tasa de Fallos	Tasa de Servicio	Factor de Utilización			P (0)	Tempo Medio en la Cola	Tempo Medio en la Cola+ desplazamiento +reparaciones
53	62,8	1,176470588	1,007169811	7,02E+22	-1,2E+24	-9,2E-25	-2,380877177	-1,530877177
54	62,8	1,176470588	0,988518519	7,85E+22	7,16E+23	1,26E-24	1,235532138	2,085532138
55	62,8	1,176470588	0,970545455	8,67E+22	2,71E+23	2,8E-24	0,397465041	1,247465041
56	62,8	1,176470588	0,953214286	9,47E+22	1,63E+23	3,89E-24	0,205012523	1,055012523

Tempo medio de servicio, en horas, en el periodo 8 a 16, días utiles=	0.85	1.5	0.76
Volume medio mensual de servicios en el periodo de 8 a 16, días utiles	10048	350	160

Figura 2. Ejemplo de dimensionamiento de personal en una compañía eléctrica. Fuente: El autor.

Apunto primero al tamaño del problema: 10.048 Órdenes de Servicio mensuales, solo en el período de 8 am a 4 pm, días hábiles. Debo señalar que era la región más grande y en el período con mayor número de llamadas. Pero llamo su atención sobre el resultado: para 54 equipos de mantenimiento (generalmente 2 electricistas), que era adoptado por la compañía hasta entonces,

el Tiempo Promedio en Cola (en realidad era el tiempo promedio que el equipo salía para reparaciones) calculado en ese número de equipos fue de 1.23h, es decir, alrededor de 1: 14h, siendo el valor calculado por el modelo adoptado muy cercano a la realidad que miden en el día a día. En otras palabras, el modelo estaba muy cerca de la realidad.

Pero lo sorprendente es que fue suficiente aumentar el número de equipos de 54 a 55, o menos del 2% para que el tiempo de cola promedio se redujera a 0.397h, o 24 minutos. La razón de esta sorprendente disminución está en la columna del Factor de Utilización, que disminuyó de 0,988% a 0,97%. En términos generales, los equipos de mantenimiento estaban tan ocupados que la curva del Factor de Utilización que ya presentamos se encuentra en un rango de pendiente prácticamente vertical.

No es común encontrar este tipo de Factor de Utilización en el mantenimiento común, al menos en lo que se llama Prioridad 1. Pero es muy común que, como los

equipos de Mantenimiento están tan ocupados, pequeñas adiciones de personal provoquen una enorme disminución de la cola. También debo señalar que, debido al espacio limitado del artículo, evité mostrar los cálculos de cuál es realmente el tiempo útil utilizado (la gente también se va de vacaciones, hay tiempo en desplazamientos, tiempo de configuración para iniciar actividades, etc.). El tiempo utilizado aquí ya ha descontado todos estos tiempos "perdidos".

Finalmente, en este caso, debo enfatizar que la solución adoptada en la práctica no fue pasar de 54 a 55 equipos, sino de 54 a 56. Esto se debe a que, cuando se cal-

culó que el Tiempo Medio para salir a reparar sería de 24 minutos, es naturalmente un promedio. Hay días en los que estos tiempos serían más cortos y otros en que serían superiores a los 24 minutos. A seguir se realizó un modelo complementario de Simulación Matemática utilizando el Método de Monte Claro. Con la adición de 2 equipos, se puede ver en la tabla que el Tiempo Promedio en Cola (tiempo desde la salida hasta la salida para reparaciones) disminuye a 0.20h, o 12 minutos. Luego se descubrió que eran casos muy raros de esperar 30 minutos o más con un aumento en los costos actuales de menos del 4%. Se realizaron cálculos idénticos para todas las regiones estatales y todos los turnos, aunque la región de la capital durante la semana fue, con mucho, la más crítica.

Las matemáticas y estadísticas para realizar todos estos cálculos se conocían desde al menos la década de 1950, pero no era factible buscar manualmente más de 10,000 órdenes de servicio para calcular el número promedio de llegadas, tarifas de servicio, distribuciones de probabilidad de búsqueda de tarifas de llegada y asistencia, etc. Y esto solo para una región con servicios y para un turno. Todo esto solo es posible hoy a través de la adopción de ERP y CMM y la evolución de las TI y las telecomunicaciones.

Se realizaron cálculos idénticos para todas las regiones estatales y todos los turnos, aunque la región de la capital durante la semana fue, con mucho, la más crítica.

3.2 Inteligencia artificial y mantenimiento

En los últimos 5 o 6 años, la llamada Inteligencia Artificial ha sido, junto con IoT (Internet of Things), los 2 ramos de la Transformación Digital más utilizados en Mantenimiento. En el Congreso de ABRAMAN 2020, hubo una Mesa Redonda donde 4 empresas presentaron sus experiencias. Entre ellos, destacaría TRANSPETRO, empresa del Grupo PETROBRAS, dedicada a la operación de petroleros, oleoductos, gasoductos y terminales petroleros.

Se aplicó Inteligencia Artificial en el área de Mantenimiento por primera vez en la compañía para analizar las fallas de los motogeneradores. En el historial de operación de estos equipos, ya existían controles basados en herramientas FRACAS (Sistema de Reportes y Análisis de Fallas y Acciones), RCM, RAM (Estudio y Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad). A pesar de toda la automatización y de ser un equipo fuertemente monitoreado, todavía había fallas. Necesitaban una herramienta que analizara las distintas variables monitoreadas (había 33 variables), correlacionándolas estadísticamente y mejorando la predicción de fallas en tiempo real.

En los análisis realizados empezaron a ver Patrones. Crearon un pequeño grupo formado por un especialista en motogeneradores y un especialista en confiabilidad. A partir de ahí, desarrollaron algoritmos para realizar el monitoreo, incluyendo a veces correlacionar 3 o más variables como síntomas predictivos. El desarrollo de todo este proceso tomó alrededor de 5 meses, con 2 meses para seleccionar los datos a controlar, estructurarlos y crear los estándares de control. Y los 3 meses restantes para la identificación y

mejora de algoritmos y metodologías.

De estos algoritmos, entre los resultados logrados, se pueden destacar los siguientes:

- Defectos menores;
- Las diversas variables comenzaron a operar con mayor en los rangos esperados;
- Mayor eficiencia en el mantenimiento;
- Nivel de impacto de anomalías y previsibilidad superior al 80%;
- Equipos más motivados por dedicarse a métodos más modernos y eficientes.

Cabe señalar que antes de este desarrollo, el equipo de TRANSPETRO podría desarrollar 3 estudios por año. Tras esta sustitución de la lógica humana por la Inteligencia Artificial y con esta lógica automatizada, desarrollan 21 estudios en 5 días.

Actualmente, los estudios se están ampliando a otros equipos como bombas y motores eléctricos. Estos últimos, por ejemplo, son más fáciles, ya que solo hay 5 variables a monitorear y correlacionar estadísticamente, el nivel de aciertos ya supera el 85%.

Por todo ello, la Inteligencia Artificial, esta automatización de la lógica humana para procesadores, añadiendo estudios de correlación entre hechos y entre variables, ya ha sido denominada por algunos, de forma simplificada, como:

"Inteligencia Artificial = Estadísticas + Programación"

18 Octubre

Gestión y Optimización de Inventarios para Mantenimiento

18 Octubre

Generación de Planes Óptimos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM

01 Noviembre

Mantenimiento Productivo Total (TPM)

01 Noviembre

Operación y Mantenimiento de Bombas Centrífugas

06 Noviembre

Fundamentos técnicos de Mantenibilidad de Equipos

08 Noviembre

Planificación, Programación y Costos de Mantenimiento

22 Noviembre

Planificación y Programación de Mantenimiento en Ambiente SAP-PM

22 Noviembre

Fundamentos de Análisis Económico en proyectos de Confiabilidad

30%
descuento

Conócelos



ENTREVISTA

Johanna Duran



¿Cómo empezaste tu aventura de trotamundos?



Desde niña he estado rodeada de una familia aventurera, recuerdo mucho los fines de semana, donde cualquier excusa era buena para ir lejos, como los Domingos de pasteles o arepas andinas en algún pueblo remoto (muchas veces muy remoto jajaja).

Tuve una gran influencia de mi Tío papá José Durán y mi padrino Javier quienes siempre me llevaban de excursión a la montaña, a conocer pueblitos, compartir con personas locales, me incentivaban a hacerles preguntas y comerme todo lo que

me pusieran en la mesa (un gran desafío para cualquier niña).

Luego, de adolescente tuve mi primer viaje internacional con mi papá, quien es investigador así que lo acompañé una temporada a USA y luego a un congreso en Barcelona España (mi primera vez del otro lado del charco) recuerdo que me dio un tiquete de uso ilimitado del metro y otro válido para utilizar el bus turístico por 2 días (venía con un mapa), allí me enamoré de la idea de conocer cada rincón de donde sea que estuviese.

Más adelante de universitaria tuve la oportunidad de representar a la ULA en varios congresos con lo que pude patrocinar algunos pasajes aéreos, pasaba unos días cumpliendo mis deberes de estudiante y luego tomaba mi tiempo para recorrer el país de mochilera (así empecé, con Perú y llegué hasta Polonia – en varios eventos claro).

Y desde ese primer viaje en “solitario” (sin representante) a Perú en el 2006, no había parado de viajar todos los años hasta la llegada del COVID.

¿Qué lugares has visitado?

Varios, aunque la verdad mucho menos de los lugares que quiero conocer, por resumir en números simples, he estado en 30 países (apenas el 16% del listado de la ONU), algunos los conozco bastante bien, pero la mayoría han sido solo pasos de turista.

¿Cuál ha sido tu viaje más magnífico que has realizado y por qué?

Es una pregunta recurrente cuya respuesta depende del ánimo y la emoción del momento, por esto y por la influenciada por mi más que prima hermana Majo abrí una cuenta de Instagram ([@hanna_adventures](https://www.instagram.com/hanna_adventures)) mostrando lugares que me gustan mucho, y que de una u otra manera han dejado algo en mí.

Respondiendo con la emoción del momento, resalto:

- Un viaje de mochilera con mi mamá por Argentina (jajaja extraño a mi mamá).
- Un viaje en un autobús dentro de Turquía (y darme cuenta de que estaba en un lugar desconocido, en un asiento específico para mujeres, sin un idioma en común con mi entorno, ni conexión a internet, a solo 3,5h de Alepo epicentro de una guerra cruenta causante de mucho sufrimiento, sintiendo la impotencia y vulnerabilidad en su máxima expresión, muda, mujer, extranjera) ese momento fue magnífico por la introspección, reflexión y ganas de poder hacer más. Y si me preguntas por un lugar o experiencia magnífica que creo que una gran mayoría disfrutaría, sería ver las Aurora Boreales, yo las vi en las afueras de Tromso (Noruega) vestida con un traje que parecía de astronauta para poder superar los -20°C , ¡Inolvidable!



¿Cuáles son los próximos lugares que visitarás?

Veamos que nos depara el destino, por ahora no hago muchos planes diferentes al de visitar a mi familia (en cualquier país donde se nos permita estar a todos, un desafío en estos tiempos). Por otro lado, he aprendido que todos los países tienen magia y lugares inolvidables.

¿En qué se complementan la Johanna Exploradora y la Consultora?

En ambos roles debo asumir desafíos, debo observar el entorno y en ambos aprendo de todos los seres y tareas que se me presentan.

Me ayuda saber que independientemente del país, del sector industrial o comercial, tenemos más puntos en común de lo que imaginamos, ya sea en oportunidades, problemas, conflictos o intereses.

¿A qué te dedicas?

En mi trabajo, me dedico a identificar oportunidades de mejora, proponer alternativas que busquen maximizar las probabilidades en que los clientes puedan optimizar la generación de valor en términos de costos, riesgo y desempeño de sus activos.

Nuestro enfoque principal está centrado en:

- La implementación de Buenas prácticas de Gestión de Activos soportadas en Sistemas de Gestión de Activos acorde a ISO 55000.
- Búsqueda de la confiabilidad operacional y organizacional.
- La optimización en la toma de decisiones.

¿Cuál es tu rol dentro de TWPL?

Soy Consultora y facilitadora en Gestión de Activos, básicamente presto servicios profesionales de asesoría en implementación y capacitación de prácticas de gestión de activos, confiabilidad y toma de decisiones.



Johanna Isabel López Durán

Cosultor en The Woodhouse Partnership Limited (TWPL).

Johanna.Duran@twpl.com



¿Cuáles son los retos que enfrentan los consultores hoy en día?

El mayor desafío que se ha presentado hoy y siempre es Ser simples y prácticos, es muy común querer ir a niveles de solución compleja sin prestar atención a las bases (donde generalmente tenemos muchas debilidades).

Ahora considerando las nuevas condiciones post COVID, nos enfrentamos al desafío de poder crear conexión y captar la atención de nuestros clientes, lograr que estén presentes, que participen en la creación de soluciones, que se abran a compartir sus dificultades. El teletrabajo tiene muchas ventajas (incluso pienso que tiene más pros que contra), pero también se presta para que todos nos distraigamos muy fácilmente tratando de atender muchas cosas en simultáneo, y pasa con frecuencia que en las sesiones de trabajo hay mucha intermitencia.

Otro desafío interesante, es el desarrollo de la capacidad de atender diferentes frentes en poco tiempo, ahora es común tener, por ejemplo, una sesión con un cliente en Colombia y unos minutos después tienes otra sesión con un cliente totalmente diferente en Chile.



José Antonio Salazar
Director General de ENETOR.
Ingeniero Mecánico, MBA, PMP.
jose.salazar@enotor.com



Luis F. Marín
Ejecutivo de negocios en
Mercosur Casa de Bolsa S.A.



Gerencia de Proyectos e Ingeniería: **Salarios y Libertad**



Los profesionales de gerencia de proyectos e ingeniería muchas veces no cuentan con un criterio establecido de salarios, es un hecho de que no ganan igual y todos se van a preguntar ¿cuánto deben ganar?, ¿por qué en algunos países pagan mejor que en otros?, ¿qué tan grande es esa diferencia?, ¿es solamente un tema de oferta y demanda, o más bien de libertad?. Para lo cual, a manera de proveer una referencia estadística y tratar de responder estas preguntas, en este artículo se utiliza data empírica de salarios de gerentes de proyectos y profesionales de la ingeniería de 41 países, desde los más libres hasta los mayormente reprimidos, usando fuentes públicas de información.

Pero a qué nos referimos cuando hablamos de libertad. El solo hecho de poder salir a las calles y opinar con otras personas sobre múltiples temas, no quiere decir que se vive en un país libre. La libertad hoy en día es posible medirla y va más allá de poder expresar un pensamiento o un sentimiento con otras personas. *The Heritage Foundation* publica anualmente un índice de libertad donde se analizan 186 países desde el punto de vista del desarrollo político y económico. Este índice de libertad se fundamenta en los siguientes 12 factores cuantitativos y cualitativos, agrupados en cuatro categorías o PILARES DE LIBERTAD:

I. SEGURIDAD JURÍDICA

1. Derecho a la propiedad privada.
2. Integridad del Gobierno.
3. Efectividad judicial.

II. TAMAÑO DEL GOBIERNO

4. Gasto público.
5. Impuestos.
6. Salud fiscal.

III. EFICIENCIA REGULATORIA

7. Libertad para hacer negocios.
8. Libertad laboral.
9. Libertad monetaria.

IV. APERTURA DE MERCADOS

10. Libertad del comercio internacional.
11. Libertad para invertir.
12. Libertad financiera.

Estos factores de libertad son evaluados en una escala del 0 al 100, se calcula un promedio de las puntuaciones y finalmente se clasifican a los países como: *Libres*, *Mayormente Libres*, *Moderadamente Libres*, *Mayormente Reprimidos* y *Reprimidos*.¹ Donde Cuba, Venezuela y Corea del Norte compiten por los últimos lugares de la clasificación, como los países más reprimidos del mundo. Sin embargo, para este artículo no se tomarán en cuenta ninguno de los países considerados como reprimidos, debido a la falta de información confiable de los salarios.

Utilizando la data de los sueldos de los gerentes de proyectos o PMs, por sus siglas en inglés, del reporte anual de salarios del Instituto de Gerencia de Proyectos (PMI). Donde se muestra el resultado de las encuestas salariales realizadas a los gerentes de proyectos en el mundo, con la participación de más de 32.000 profesionales en más de 37 países, considerando factores clave como posición, años de experiencia e industria¹. Más los datos de los salarios del ingeniero promedio, extraídos de páginas de búsqueda de empleo como *Glassdoor.com*; una de las plataformas de reclutamiento más grandes del mundo, con millones de ofertas de empleo publicadas, revisiones de empresas e informes salariales². Fue posible crear la Tabla 1, como un resumen estadístico mundial de los salarios de los gerentes de proyectos y los ingenieros, mostrados en las columnas A y B respectivamente. Con los valores máximos, mínimos y promedios. Así como también el promedio más o menos una desviación estándar ($\pm 1DS$).

Tabla 1. Resumen estadístico de los valores encontrados en el estudio. Comparaciones entre salarios de Gerentes de Proyectos (PM por sus siglas en inglés), Ingenieros y PIB per Cápita. Se observa una amplia banda entre los valores mínimos y máximos, y como era de esperarse una alta correlación entre estas variables.

Mundo	A: PM Salario Promedio [USD/Año]	B: Ingeniero Salario Promedio [USD/ Año]	C: Relación de salarios PM/ Ingeniero	D: PIB per Cápita [USD/ Año]	E: Relación salario costo de vida PM/PIB	F: Relación salario costo de vida Ingeniero/PIB
Máximo	132.086	100.881	5,98	82.797	14,30	5,31
Promedio +1DS	87.198	54.606	3,46	53.330	6,78	2,44
Promedio	58.577	32.715	2,32	29.502	3,67	1,52
Promedio -1DS	29.956	10.824	1,17	5.674	0,56	0,61
Mínimo	13.933	2.494	1,29	1.482	1,09	0,53
Correlación			0,94		0,91	0,85

La columna C, muestra las relaciones encontradas entre los salarios de los PMs y los ingenieros. En esta se observa que en promedio los gerentes de proyectos ganan 2,32 veces más que los ingenieros, hay países donde solo hay una diferencia de 29% más y en otros la relación puede llegar a ser de casi seis veces mayor (5,98). Al final de la columna, como era de esperarse, se observa que ambos salarios están altamente correlacionados con un valor de 0,94.

Para comparar estos salarios y los costos de vida en los diferentes países, se consideró el PIB per Cápita mostrado en la columna D,

que es igual al PIB dividido entre la cantidad poblacional. Es decir, para este estudio se asume al PIB per Cápita como una estimación del ingreso promedio de los hogares o costo de vida del país. Sin ir al detalle, asumiendo un hogar conformado por una pareja, este ingreso puede ser generado o cubierto solo por una persona o ambas trabajando. Observándose que en promedio el PIB per Cápita de los países considerados en el estudio es cercano a los 30.000 USD/Año, con un amplio margen que va desde mínimos de casi unos 1.500 USD/Año, hasta máximos de más de 80.000 USD/Año.

Mientras que las columnas E y F, para los PMs e ingenieros respectivamente, se muestran las relaciones entre los salarios y el PIB per Cápita de los países, donde se aprecia que en promedio los gerentes de proyectos superan 3.67 veces el costo de vida, en algunos países a penas igualan este valor, mientras que en otros es 14 veces superior. De igual manera, los ingenieros ganan en promedio un 52% más que el ingreso medio de los hogares, con países donde este valor es 5 veces mayor y en otros puede incluso ser más bajo que el costo de vida del país.

Lo anteriormente expuesto ahora se muestra por cada país (Tabla 2), más el índice de libertad como una variable adicional en la columna G:

Tabla 2. Valores por país y su respectivo índice de libertad. Salarios de Gerentes de Proyectos (PM), Ingenieros y PIB per Cápita por cada país considerado. Se observa que, a mayor índice de libertad mayores son los salarios, así como el PIB per Cápita. De igual forma, las relaciones entre los valores disminuyen. En otras palabras, mientras mayor represión menores son los salarios tanto de PMs como de los ingenieros, y la diferencia entre ambos aumenta.

#	País	A: PMs Salario Promedio ⁴ [USD/Año]	B: Ingenieros Salario Promedio ⁵ [USD/Año]	C: Relación salarios PM/Ingeniero	D: PIB per Cápita ⁶ [USD/Año]	E: Relación salario costo de vida PM/PIB	F: Relación salario costo de vida Ingeniero/PIB	G: Índice de Libertad ⁷
1	Suiza	132.086	100.881	1,31	82.797	1,60	1,22	Libre
2	EE.UU.	116.000	72.323	1,60	62.795	1,85	1,15	Mayormente Libre
3	Australia	101.381	56.889	1,78	57.374	1,77	0,99	Libre
4	Alemania	96.987	66.086	1,47	47.603	2,04	1,39	Mayormente Libre
5	Países Bajos	93.839	58.796	1,60	53.024	1,77	1,11	Mayormente Libre
6	Bélgica	92.352	57.858	1,60	47.519	1,94	1,22	Moderadamente Libre
7	Irlanda	85.829	44.583	1,93	78.806	1,09	0,57	Libre
8	Reino Unido	83.410	43.729	1,91	42.944	1,94	1,02	Mayormente Libre
9	Qatar	81.668	36.264	2,25	68.794	1,19	0,53	Mayormente Libre
10	Emiratos Árabes	81.665	34.035	2,40	43.005	1,90	0,79	Mayormente Libre
11	Nueva Zelanda	81.196	47.905	1,69	41.945	1,94	1,14	Libre
12	Hong Kong	76.607	34.447	2,22	48.676	1,57	0,71	Libre
13	Canadá	73.355	56.802	1,29	46.233	1,59	1,23	Mayormente Libre
14	Suecia	72.759	46.354	1,57	54.608	1,33	0,85	Mayormente Libre
15	Singapur	71.279	35.594	2,00	64.582	1,10	0,55	Libre
16	Francia	68.663	48.528	1,41	41.464	1,66	1,17	Moderadamente Libre
17	Japón	66.188	50.548	1,31	39.290	1,68	1,29	Mayormente Libre
18	Arabia Saudí	63.944	26.556	2,41	23.339	2,74	1,14	Moderadamente Libre
19	Corea del Sur	62.835	43.188	1,45	31.363	2,00	1,38	Mayormente Libre
20	Sudáfrica	62.455	33.872	1,84	6.374	9,80	5,31	Mayormente Reprimido
21	Italia	57.219	39.442	1,45	34.483	1,66	1,14	Moderadamente Libre
22	Chile	54.682	24.176	2,26	15.923	3,43	1,52	Mayormente Libre
23	España	52.642	37.370	1,41	30.371	1,73	1,23	Moderadamente Libre
24	Polonia	47.841	18.949	2,52	15.421	3,10	1,23	Moderadamente Libre
25	Portugal	45.775	35.467	1,29	23.408	1,96	1,52	Moderadamente Libre
26	Brasil	38.643	21.863	1,77	8.921	4,33	2,45	Mayormente Reprimido
27	Costa Rica	37.409	22.854	1,64	12.027	3,11	1,90	Moderadamente Libre
28	Malasia	36.247	11.520	3,15	11.373	3,19	1,01	Mayormente Libre
29	México	35.863	11.234	3,19	9.673	3,71	1,16	Moderadamente Libre
30	Ecuador	35.000	24.000	1,46	6.345	5,52	3,78	Mayormente Reprimido
31	Federación de Rusia	34.541	11.937	2,89	11.289	3,06	1,06	Moderadamente Libre
32	Perú	33.774	11.596	2,91	6.941	4,87	1,67	Moderadamente Libre
33	Filipinas	32.135	6.674	4,82	3.103	10,36	2,15	Moderadamente Libre
34	Colombia	30.800	14.201	2,17	6.668	4,62	2,13	Moderadamente Libre
35	China	29.075	15.806	1,84	9.771	2,98	1,62	Mayormente Reprimido
36	Indonesia	28.980	7.230	4,01	3.894	7,44	1,86	Moderadamente Libre
37	India	28.750	6.605	4,35	2.010	14,30	3,29	Mayormente Reprimido
38	Turquía	28.698	14.326	2,00	9.370	3,06	1,53	Moderadamente Libre
39	Nigeria	20.246	5.648	3,58	2.028	9,98	2,78	Mayormente Reprimido
40	Pakistán	14.914	2.494	5,98	1.482	10,06	1,68	Mayormente Reprimido
41	Egipto	13.933	2.675	5,21	2.549	5,47	1,05	Mayormente Reprimido

La Tabla 2, valores por país y su respectivo índice de libertad, se encuentra ordenada por salarios de los PMs, de mayor a menor. Y en la columna G, se puede observar rápidamente que existe una alta correlación entre los salarios y el índice de libertad económica. A medida que se baja en la tabla, los salarios son menores y la libertad también.

De igual forma, en la Figura 1 se presentan de manera gráfica las tendencias de Salario Promedio versus Libertad, para ambos casos. Con R^2 mayores a 0.4, confirmando que mientras más libertad existe en un país, mayores serán los salarios de los PMs e Ingenieros.

Con algunos histogramas de frecuencia se puede cuantificar la cantidad de países con similares relaciones salariales, para encontrar lo que pudiera ser considerado como valores normales.

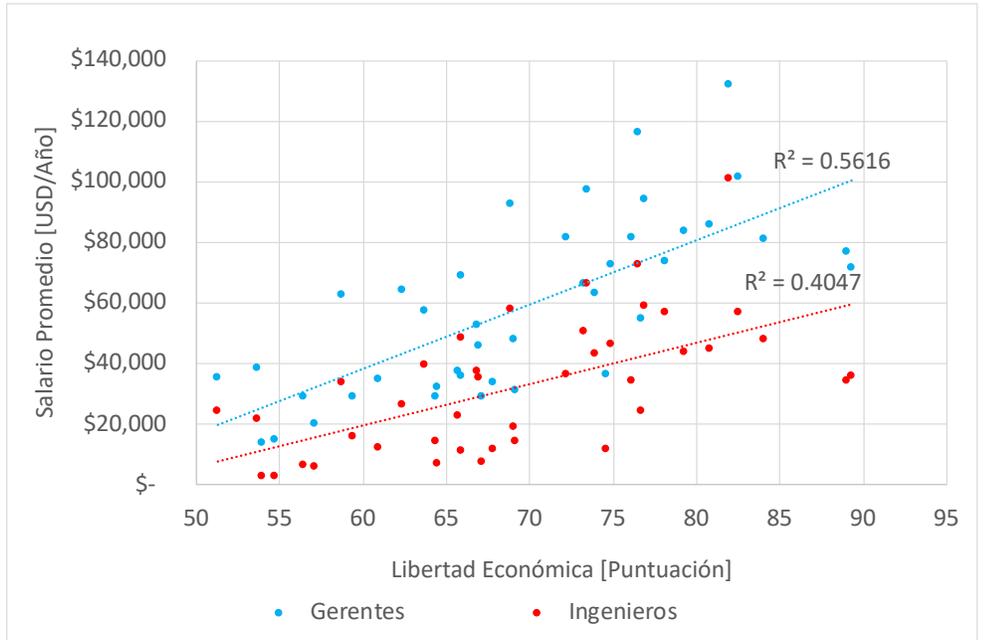


Figura 1. Tendencia de Salario Promedio versus Libertad.

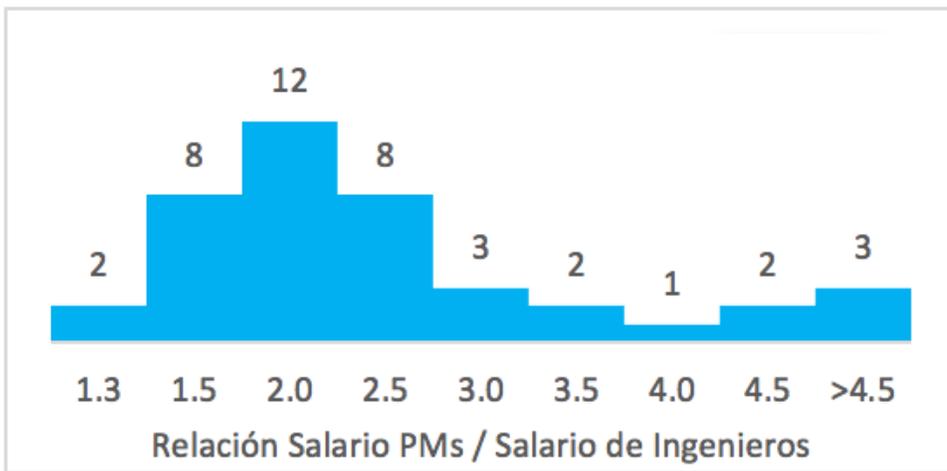


Figura 2. Histograma de salario de PMs versus salario de Ingenieros.

En la Figura 2 (Histograma de Salario PMs versus Salarios de Ingenieros) se puede observar que normalmente el salario de los gerentes duplica al de los ingenieros con una frecuencia de 12 países. Con una cantidad importante de países donde los salarios son más de 4 veces mayores con una frecuencia de 6 países. Sin embargo, esto ocurre mayormente en los países con menores libertades y menores salarios para ambas partes.

Respecto al PIB per Cápita o costo de vida, en la Figura 3 (Histogramas de Salarios de PMs e Ingenieros versus PIB per Cápita) se aprecia que normalmente, con una frecuencia de 10 países, el salario de los gerentes de proyectos es 2.5 veces mayor que el costo de vida promedio, y el de los ingenieros es 1.5 veces mayor con una frecuencia de 19 países. De igual manera, se observan casos donde ambos salarios pueden llegar a ser mayores a 3.5 veces el costo de vida de la población o PIB per Cápita. Pero al igual que el caso anterior, esto último ocurre mayormente en los países con salarios más bajos y con menores libertades. En cualquiera de los casos, independientemente del país, estudiar ingeniería siempre será una buena opción.

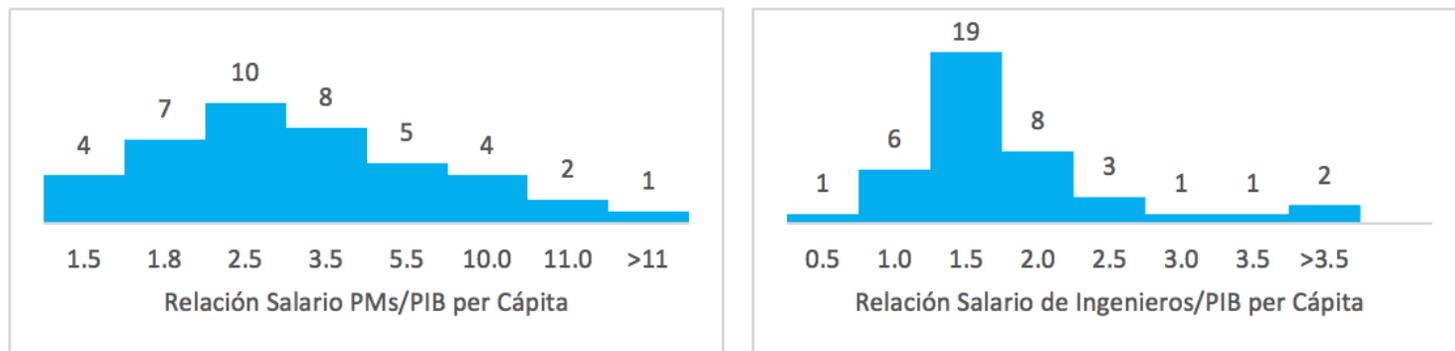


Figura 3. Histogramas de Salarios de PMs e Ingenieros versus PIB per Cápita.

Con esta información es posible entender a qué se refieren cuando hablan de las economías de escala. Con los mismos 120.000 USD de un PM en un país *Libre*, en otros países se podría contratar a un PM con el mismo perfil por 28.750 USD, más 10 ingenieros de proyectos por 6.605 USD y otros 10 asistentes de ingeniería por 2.010 USD cada uno, durante un año entero. Es decir, la magnitud de la escala económica puede ser tan grande que, con el salario de un solo profesional en un país con mayores libertades se podría contratar a un equipo completo de ingeniería de proyectos en un país *Reprimido*.

Evidentemente aquí hay un problema, pero la solución no es pedir la disminución de los sueldos de los profesionales en los países más libres, o exigir más controles para ellos, ni mucho menos criticarlos o envidiarlos. La solución comienza con buscar estrategias sobre cómo generar mayor libertad en los países *Menos Libres* y *Reprimidos*, usando como referencia de medición y establecimiento de objetivos clave, a factores de libertad como los expuestos al inicio del artículo. Y como una consecuencia de una mayor libertad, los salarios deberían aumentar, así como mejorar la calidad de vida de la población en general.

Por otro lado, en países con muy alta libertad económica como Irlanda, Qatar, Singapur, Australia, Suiza, Hong Kong y los Emiratos Arabes Unidos, aunque igualmente muestran que el salario de los gerentes de proyectos es mayor que el PIB per Cápita, inesperadamente el estudio exhibe que el salario de los ingenieros es menor al PIB per Cápita del país. La razón de este fenómeno escapa del alcance de este artículo, pero se asume que estos países tienen tanta libertad, que existen muchas otras profesiones mejor pagadas que la de los ingenieros.

Revisando un poco más a fondo cuáles son los factores de libertad que más afectan los salarios (Tabla 3), es decir, ¿por dónde empezar?. La siguiente tabla muestra, ordenados de mayor a menor, la correlación existente entre los salarios, los factores de libertad y otros indicadores macroeconómicos como el PIB.

Se puede confirmar que los factores de libertad están altamente correlacionados con los salarios, como ya se había expuesto anteriormente. Pero adicionalmente encontramos que, los salarios aumentan a medida que aumenta la integridad del gobierno, el derecho a la propiedad privada y la libertad financiera. Y en el otro sentido, los salarios serán menores a medida que aumentan los aranceles, los impuestos, la inflación y el gasto público.

Tabla 3. Correlación entre indicadores macroeconómicos y salarios.

En verde la correlación positiva, y en rojo la correlación negativa.

Correlaciones	Salario de PM	Salario de Ingeniero
Índice de Libertad	0.72	0.61
Integridad del Gobierno	0.84	0.82
Derecho a la propiedad privada	0.76	0.73
Libertad financiera	0.74	0.68
<u>PIB per Cápita</u>	0.73	0.60
Efectividad judicial	0.68	0.62
Libertad para hacer negocios	0.60	0.53
Libertad de comercio internacional	0.55	0.47
Libertad para hacer inversiones	0.54	0.56
Libertad monetaria	0.54	0.51
Libertad laboral	0.48	0.34
Salud fiscal	0.38	0.31
<u>Impuestos Sobre la Renta</u>	0.06	0.21
Impuestos	-0.28	-0.46
Gasto público	-0.40	-0.53
<u>Inflación</u>	-0.45	-0.43
<u>Impuestos corporativos</u>	-0.47	-0.34
<u>Aranceles</u>	-0.50	-0.45

El estudio también muestra que dentro de los países con mayores salarios se encuentra Bélgica, que a su vez es considerado como un país moderadamente libre, creando una interrogante. Sin embargo, investigando la razón de esto se pudo encontrar que, en años anteriores, Bélgica se encontraba dentro de los países mayormente libres, pero ha descendido en el índice debido a que ha estado incrementando su gasto público de una manera que puede ser considerada insostenible⁸. Lo que pudiera generar en un futuro cercano una baja de los salarios en términos reales, debido a la inflación. O en el mejor de los casos, podrían disminuir su gasto público y retornar al nivel de países mayormente libres.

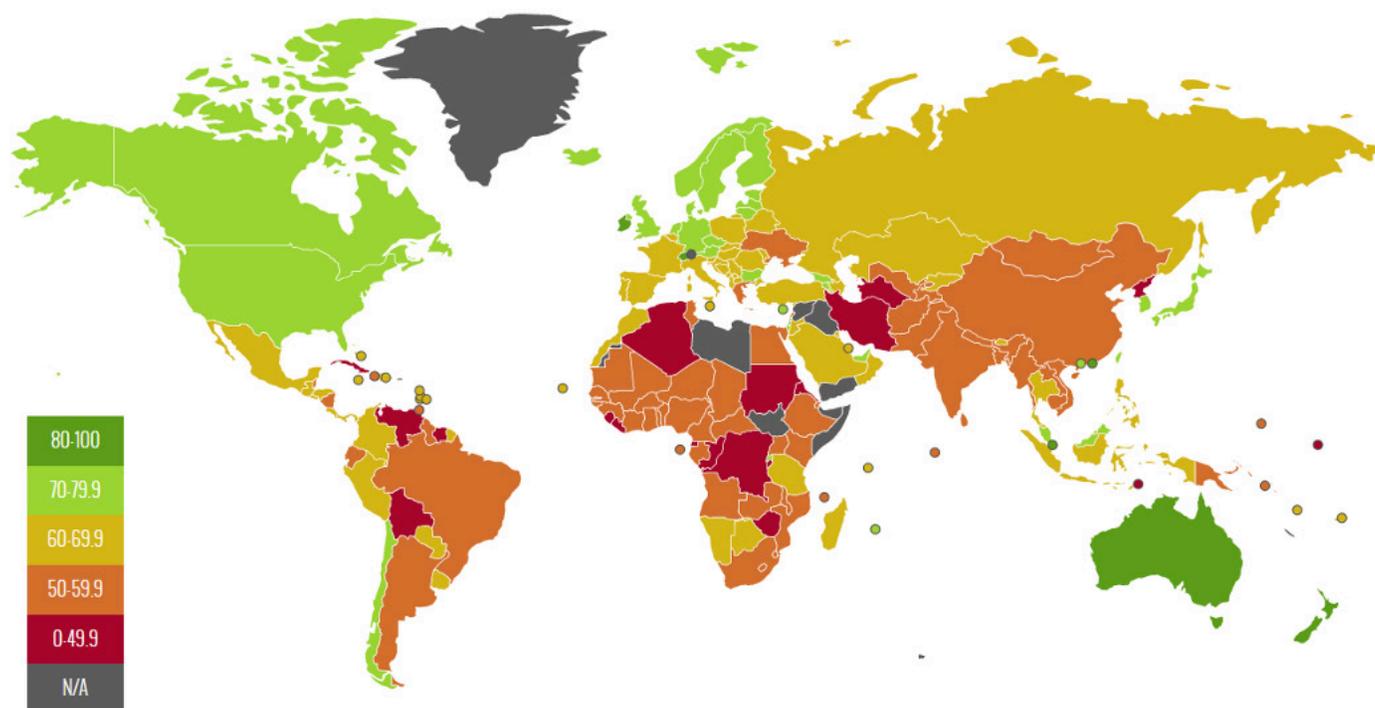


Figura 4. El Índice de Libertad Económica de la Fundación Heritage de 2020.

En el otro extremo, se encuentra Malasia con un salario bajo, ubicado dentro de los países mayormente libres⁹. El motivo que pudiera explicar esto, según este estudio, es que Malasia posee altas tasas de impuestos en las transacciones internacionales o aranceles, lo cual está negativamente correlacionado con los salarios, así como baja integridad del gobierno y baja libertad financiera, ambos factores altamente correlacionados de manera positiva con los salarios.

De igual manera, otro país que genera una interrogante es Sudáfrica. A pesar de ser un país mayormente reprimido, posee salarios medios, en

relación con los otros países. Lo cual se podría explicar debido a que recientemente en el año 2019, la economía de Sudáfrica cayó dentro de los países más reprimidos después de estar por 24 años en la categoría de moderadamente libre, debido a que el crecimiento de su PIB ha sido bastante bajo durante los 5 años anteriores y ha estado experimentando inconvenientes políticos¹⁰. Es decir, al igual que Bélgica, es un país que está pasando por un proceso de transición donde estos salarios pudieran bajar con el tiempo o la economía pudiera mejorar para ubicarse nuevamente como un país moderadamente libre.

Referencias

Nota: Es importante aclarar que ninguna de las fuentes de información (The Heritage Foundation, PMI o Glassdoor.com) tienen nada que ver con el incentivo de redactar este artículo, simplemente se ubicaron fuentes de información que el lector pudiera reconocer fácilmente y consultar de manera gratuita.

- 1.- 2020 Index of Economic Freedom by The Heritage Foundation.
<https://www.heritage.org/index/ranking>
- 2.-Earning Power: Project Management Salary Survey—Eleventh Edition (2020).
<https://www.pmi.org/learning/careers/project-management-salary-survey>
- 3.-Glassdoor
<https://www.glassdoor.com/Salaries/index.htm>
- 4.-Earning Power: Project Management Salary Survey—Eleventh Edition (2020)
<https://www.pmi.org/learning/careers/project-management-salary-survey>
- 5.- Glassdoor.com salaries surveys.
<https://www.glassdoor.com/Salaries/index.htm>
- 6.-World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files.
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>
- 7.- 2020 Index of Economic Freedom by The Heritage Foundation
<https://www.heritage.org/index/explore>
- 8.- <https://www.heritage.org/index/country/belgium>
- 9.- <https://www.heritage.org/index/country/malaysia>
- 10.- <https://www.heritage.org/index/country/southafrica>

Conclusión

- Este artículo muestra tablas y datos que sirven de referencia salarial, para las estimaciones de costos en la gerencia de proyectos de ingeniería.
- Hoy en día es posible medir y comparar la libertad de los países, usando índices de libertad como el de *The Heritage Foundation* y sus 12 factores cuantitativos y cualitativos, agrupados en cuatro categorías o PILARES DE LIBERTAD.
- Estadísticamente se puede demostrar con un modelo simple, usando data pública y de fácil acceso, que mientras más libertad existe en un país, mayores serán los salarios de los gerentes de proyectos, los Ingenieros y la población en general.
- Normalmente, en el mundo, los salarios de los gerentes es dos veces el de los ingenieros, y el de los ingenieros son un 50% mayor al del resto de la población. Brechas que disminuyen en los países más libres y aumenta en los más reprimidos.
- Las enormes brechas salariales en las economías de escala, no se deben a que hay muchos ganando más que otros, se deben a que hay países menos libres que otros.
- Finalmente, los salarios reales aumentan a medida que aumentan factores como la integridad del gobierno, el derecho a la propiedad privada y la libertad financiera. Y disminuyen a medida que aumentan los aranceles, los impuestos, la inflación, el gasto público, entre otros.



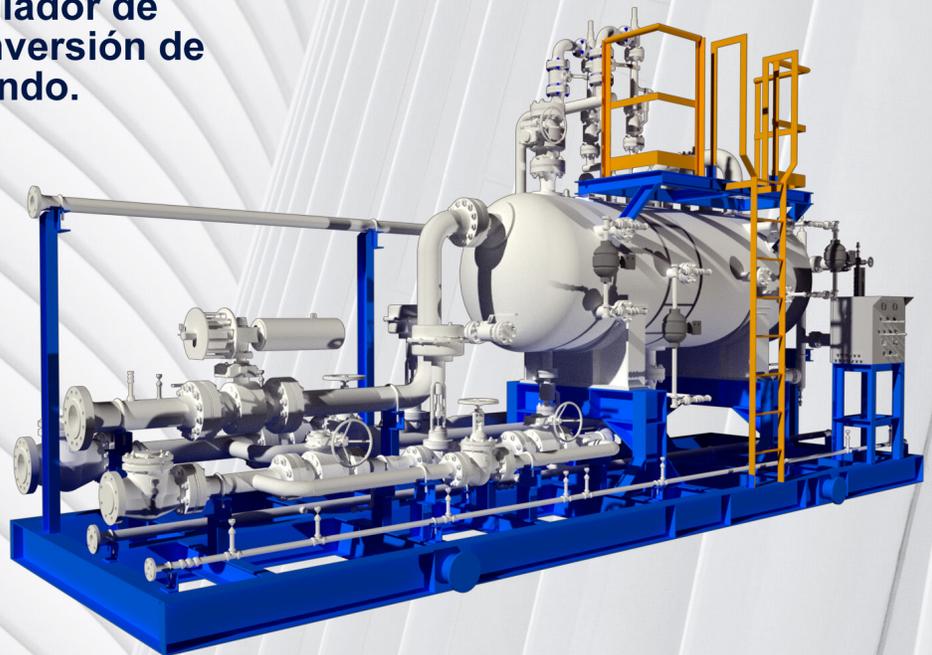
ENETOR

Energy Engineering Simulators

ENETOR, es una empresa de tecnología enfocada en el desarrollo de simuladores de ingeniería para la industria de la energía.

Somos una empresa centrada en el cliente, donde ofrecer soluciones ajustadas a sus necesidades son nuestra prioridad.

Nuestra visión es ser el simulador de ingeniería de proyectos de inversión de capital más confiable del mundo.



Para usar nuestros simuladores contáctanos por el correo inf@enotor.com o suscríbete gratis en nuestra página

www.enotor.com



ENTREVISTA

Dr. Giacomo Barbieri





Dr. Giacomo Barbieri

1. ¿Quién es Giacomo Barbieri? ¿Cuál es tu rol en la universidad de los Andes?

Después de un pregrado y una maestría en ingeniería mecánica, y un doctorado en automatización industrial en la Universidad de Modena y Reggio Emilia (Italia), llegué a la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia) en Julio 2016. Desde ese momento, soy profesor asistente del departamento de ingeniería mecánica e imparto cursos en el área de dinámica de sistemas mecánicos, de automatización industrial y de mantenimiento industrial.



3. ¿Qué carreras de esa rama están en la universidad?

En la Universidad de los Andes, no hay una carrera específica en Mantenimiento Industrial. Hay profesores como yo que trabajan dentro de su línea de investigación en Mantenimiento. Sin embargo, hace falta una carrera en el tema, especialmente considerando que un gran número de egresados del programa de ingeniería mecánica trabaja en el área de mantenimiento y gestión de activos. Es por esta razón que el departamento de ingeniería mecánica está en proceso de tener un programa novedoso y pensado para la industria nacional y latinoamericana que esperamos lanzar en breve.



2. ¿En qué proyectos estás actualmente participando?

Tengo dos líneas de investigación: automatización y mantenimiento industrial. El enfoque de la línea de mantenimiento industrial es en el tema de Modernización Inteligente aplicada al mantenimiento (Smart Retrofitting en inglés). Esta línea consiste en integrar tecnologías de la transformación digital (p.ej. sensores, internet de las cosas, etc.) a activos de vieja generación para que puedan acceder a las oportunidades que están surgiendo en el mantenimiento gracias a la Industria 4.0; p. ej. mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en la condición con monitoreo continuo, etc. Actualmente estoy trabajando con 'The Association for Manufacturing Technology' (AMT) en un proyecto para el envío de datos de maquinas a través del protocolo MTConnect y del microcontrolador Raspberry Pi. El objetivo es desarrollar una solución de bajo costo y aplicable industrialmente para enviar datos de campo a la nube.



4. ¿Nos podrías platicar acerca de la conferencia que están organizando? ¿Cuál es la temática y la relevancia en el contexto actual?

La conferencia hace parte de los eventos patrocinados científicamente por la ‘Federación Internacional de Automatización’ (IFAC, por sus siglas en inglés). Esta organización fue creada en el año 1957 e incluye representaciones de 49 países. IFAC tiene el objetivo de fomentar la ciencia y la tecnología detrás de la automatización en todos sus aspectos. IFAC está dividida en diferentes comités técnicos según los temas de trabajo. En particular, hago parte del comité técnico 5.1¹ (‘Control de plantas de manufactura’) lo cual incluye un grupo de trabajo en ‘Ingeniería de mantenimiento avanzado, servicios y tecnología’ (AMEST, por sus siglas en inglés). En promedio, cada tres años se tiene una conferencia organizada por el grupo de trabajo AMEST. Hasta el momento se han desarrollado cuatro conferencias AMEST, todas en Europa.

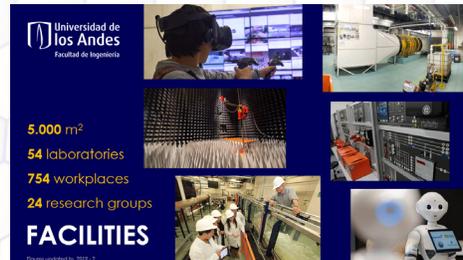
Después de la última edición organizada por la Universidad de Cambridge y Cranfield (Reino Unido), logramos llevar la conferencia a Latinoamérica. Esta se realizará en la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia) el 26-29 Julio 2022. La conferencia reunirá a expertos internacionales del mundo académico y de la industria para presentar y debatir los últimos avances en Mantenimiento y Gestión de Activos. En la última edición se trató principalmente el tema de mantenimiento y de la gestión de activos en la actual era digital. Siendo la primera conferencia AMEST en Latinoamérica, el enfoque de la siguiente edición será el “Smart Retrofitting” ya que aborda las necesidades reales expresadas por organizaciones de todos los tamaños – en particular por los gerentes de PYMES – que dentro de presupuestos limitados tienen que enfrentar decisiones sobre si adquirir nuevos activos inteligentes o realizar una modernización de sus equipos para aprovechar de las oportunidades que están surgiendo en el mantenimiento gracias a la Industria 4.0.

Por este motivo, invitamos a empresas e investigadores a compartir sus soluciones digitales innovadoras, sus experiencias en el camino hacia la digitalización, así como desafíos y oportunidades en el área de mantenimiento y de la gestión de activos. Además, la participación de empresas y universidades de América Latina sería importante para la construcción de una red latinoamericana para el avance tecnológico en mantenimiento y gestión de activos. Pueden encontrar toda la información relativa a la conferencia en:

<https://amest2022.uniandes.edu.co/>

o pueden contactarnos en el correo amest@uniandes.edu.co





5. ¿Qué otros trabajos se están llevando a cabo en la universidad? ¿con que otras áreas o disciplinas colaboras activamente?

La Universidad de los Andes tiene 731 profesores divididos en 10 facultades y es la cuarta universidad de Latinoamérica según el ranking QS 2020. Por lo tanto, resulta un poco complicado hablar de todo lo que ocurre en la universidad. Sin embargo, quiero mencionar la iniciativa en Sociedad 5.0: un proyecto multidisciplinario en el que estoy trabajando desde hace tres años. Este consiste en un trabajo colaborativo entre tres actores de la universidad: la Facultad de Ingeniería, el Centro de Ética Aplicada y el Centro de Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina.

El concepto de Sociedad 5.0 nació en Japón en el 2016 y se entiende como la inclusión de los aspectos éticos y de sostenibilidad en el desarrollo de proyectos que apuestan a la resolución de problemas de la sociedad integrando las tecnologías de la transformación digital y soluciones basadas en la naturaleza. El objetivo principal de esta iniciativa en la universidad es ofrecer a diferentes actores de la sociedad (industria, gobierno, académicos, estudiantes, y comunidad en general) espacios que les permitan entender y aplicar las tecnologías de la transformación digital, teniendo en cuenta la interrelación de dichas tecnologías con las dimensiones éticas y de sostenibilidad, lo que es clave para el progreso hacia la Sociedad 5.0. En el marco de la iniciativa, hemos realizado un foro en el tema² y un curso para estudiantes y profesionales³, junto a diferentes publicaciones científicas.



Giacomo Barbieri
Profesor Asistente de la Universidad de los Andes.
g.barbieri@uniandes.edu.co



¹ <https://sistemas.uniandes.edu.co/foro/miso/2020/>

² <https://educacioncontinua.uniandes.edu.co/es/programas/sociedad-50-transformacion-digital-etica-y-sostenibilidad>

6. ¿Cuál es tu interacción con la industria real?

Con respecto a lo que ocurre en Europa, me parece que tendencialmente en la universidad hay menos colaboración entre industria y academia. Por lo tanto, hasta el momento no fueron muchas las interacciones que tuve con la industria. Esto se dio también porque antes tuve que formar mis líneas de investigación, preparar los diferentes cursos que dicto y adquirir las competencias necesarias para poder aportar al sector externo. Este año comencé el proyecto con AMT del cual hablé algunas preguntas antes. Espero que en los próximos años pueda colaborar más con las empresas para que mi investigación pueda generar un impacto positivo en la sociedad.



7. ¿Qué visión propones para la industria?, ¿tienes alguna sugerencia para el sector industrial?

La única sugerencia que me gustaría dar al sector industrial es la de incrementar la colaboración con la academia. Hoy en día el panorama tecnológico es muy amplio y evoluciona muy rápidamente. Creo que el conocimiento de la academia pueda apoyar a las empresas en optimizar los beneficios que se pueden obtener de las tecnologías en la mejora de sus procesos. Finalmente, la universidad tiene un conocimiento que no es estrictamente técnico y este podría ser útil a las empresas para tener una visión holística de sus procesos para el desarrollo de soluciones éticas y sostenibles tanto de un punto de vista ambiental como social y económico. Espero que la conferencia del próximo año pueda apoyar en la formación de colaboraciones entre industria y academia.



Un caso de estudio para el aprendizaje

basado en problemas
en la evaluación del
diagnóstico de averías



IFAC Papers
Online
CONFERENCE PAPER ARCHIVE



**Giacomo Barbieri**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia).

g.barbieri@uniandes.edu.co

**David Sánchez Londoño**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia).

d.sanchezl@uniandes.edu.co

**Laura Cattaneo**

Departamento de Gestión, Economía e Ingeniería Industrial, Politécnico de Milán (Italia).

laura.l.cattaneo@polimi.it

**Luca Fumagalli**

Departamento de Gestión, Economía e Ingeniería Industrial, Politécnico de Milán (Italia).

luca.l.fumagalli@polimi.it

**David Romero**

Tecnológico de Monterrey, Monterrey (México).

david.romero.diaz@gmail.com



Resumen: El uso del Mantenimiento Predictivo Basado en la Condición (CBPdM) ha crecido significativamente debido al movimiento de la Industria 4.0 y a los avances en la adquisición, recopilación, almacenamiento y análisis de datos. En la educación moderna de la ingeniería de mantenimiento, existe la necesidad de incluir el CBPdM junto con los enfoques tradicionales de mantenimiento. En este artículo se propone un caso de estudio para la educación en la Evaluación del Diagnóstico de Fallos (FDA) utilizando el enfoque de Aprendizaje Basado en Problemas (PBL). Siguiendo el enfoque PBL, el caso de estudio propuesto consiste en un problema “cercano a la vida real” y permite la implementación de la mayoría de los pasos de la FDA, y la evaluación de la respuesta a través de métricas objetivas. Esperamos que este trabajo pueda impulsar la producción de más estudios de caso educativos dentro del tema del PFCdM.

Copyright © 2020 Los autores. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Palabras clave: Enseñanza de la Ingeniería, Ingeniería de Mantenimiento, Evaluación del Diagnóstico de Fallos, Mantenimiento Basado en la Condición, Mantenimiento Predictivo, Aprendizaje Basado en Problemas, Industria 4.0.

1. Introducción

Las estrategias actuales de mantenimiento han evolucionado desde el mantenimiento por avería hasta el mantenimiento preventivo, pasando por el predictivo (Martin, 1994). El *Mantenimiento por Avería* es la forma más antigua de mantenimiento, en la que no se toman medidas para mantener el equipo hasta que falla y, por consiguiente, necesita una reparación o una sustitución. En la década de 1950 se introdujeron las estrategias de *Mantenimiento Preventivo*, que requieren un mantenimiento en un intervalo de tiempo (o de uso), independientemente del estado de salud del activo. Más tarde, surgieron las estrategias de *Mantenimiento Predictivo* (PdM, también conocido como Prognosis y Gestión de la Salud de Activos) y se definieron como programas de mantenimiento preventivo basados en la condición y divididos en tres actividades principales: evaluación de la salud, diagnóstico y pronóstico (Lee et al., 2017). La actividad de *evaluación de la salud* consiste en estimar y cuantificar el estado de salud de un activo en funcionamiento; la actividad de *diagnóstico* se refiere a la detección, el aislamiento y la clasificación automatizados de los fallos; y la actividad de *pronóstico* se refiere a la predicción automatizada de los fallos antes de que se produzcan (Jardine et al., 2006).

El *Mantenimiento Basado en la Condición* (CBM) intenta supervisar la salud de la maquinaria basándose en mediciones de la condición que no interrumpen el funcionamiento normal de la máquina (Heng et al., 2009). El PdM

que implementa técnicas de CBM se conoce como *Mantenimiento Predictivo Basado en la Condición* (CBPdM) (Park, 1993). El campo de investigación del CBPdM ha crecido significativamente debido al movimiento de la *Industria 4.0* y a los avances en la adquisición, recopilación, almacenamiento y análisis de datos. Por lo tanto, el “conocimiento” del CBPdM se está convirtiendo en algo fundamental para los estudiantes de posgrado de ingeniería. Este trabajo trata sobre el diagnóstico a través de técnicas de CBM conocidas como *Evaluación de Diagnóstico de Fallos* (FDA) (Li et al., 2020).

Tradicionalmente, los planes de estudios de ingeniería se *basaban en el contenido* y se centraban en las ciencias de la ingeniería y los cursos técnicos, sin proporcionar suficiente integración de estos temas ni relacionarlos con la práctica industrial (Mills y Treagust, 2003). En las últimas décadas ha habido una tendencia general en las Instituciones de Educación Superior (IES) hacia enfoques más *centrados en el estudiante* que hacen hincapié en: el aprendizaje autodirigido, el aprendizaje colaborativo y el aprendizaje relacionado con la práctica (Savery, 2006). Un ejemplo de estos modelos educativos es el “aprendizaje basado en problemas”.

El *Aprendizaje Basado en Problemas* (PBL) permite a los estudiantes realizar investigaciones, integrar la teoría y la práctica, y aplicar conocimientos y habilidades mediante el desarrollo de soluciones viables a problemas estructurados para los que se identifica claramente el estado existente y el deseado. Se ha demostrado que el PBL mejora “la retención a largo plazo, el desarrollo de habilidades y

la satisfacción de estudiantes y profesores, mientras que la clase tradicional es más eficaz para la retención a corto plazo, medida por los exámenes estandarizados de la junta” (Strobel y Van Barneveld, 2009).

En el PBL, el “problema” es el componente más crítico, ya que determina la dirección del proceso de aprendizaje. Un problema mal formulado puede hacer que los estudiantes pierdan conocimientos fundamentales del curso. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es la definición de un “problema para la educación” en la FDA utilizando el enfoque PBL.

El trabajo está estructurado como sigue: La sección 2 resume las principales características del PBL y de la FDA seleccionando los requisitos educativos que debe cumplir el problema. La sección 3 ilustra el caso de estudio propuesto y la sección 4 verifica el cumplimiento de los requisitos educativos identificados. En la sección 5 se presentan las conclusiones y se marcan las direcciones del trabajo futuro.

2. Marco Teórico

2.1. Aprendizaje basado en problemas

El PBL se basa en la creciente evidencia que apoya la creencia de que las *experiencias educativas* activas y experienciales son más transferibles que las instrucciones pasivas basadas en conferencias (Savery & Duffy, 1995). En la *Enseñanza de la Ingeniería*, diferentes estudios han demostrado que el PBL conduce a mejores resultados en comparación con el aprendizaje tradicional basado en conferencias (Hsieh & Knight, 2008; Yadav et al., 2011).

En comparación con el *aprendizaje basado en proyectos*, que se centra en la definición y realización de “problemas no estructurados”, en el aprendizaje basado en problemas los estudiantes desarrollan soluciones viables a “problemas estructurados”. El *aprendizaje basado en proyectos* está dirigido a la *aplicación* de conocimientos, mientras que el *aprendizaje basado en problemas* (PLB) está más dirigido a la *adquisición* de conocimientos (Perret et al., 2000). Por esta razón, en este trabajo se adopta el PBL.

Según Barrows (1984), el PBL es un enfoque educativo en el que se aplica el siguiente proceso cíclico:

- 1) *Análisis del problema*: Los estudiantes se encuentran primero con problemas, en lugar que con hechos y teorías. Se desarrollan habilidades de razonamiento profesional y se identifican las necesidades de aprendizaje en un entorno cooperativo con un tutor.
- 2) *Autoaprendizaje*: Estudio autodirigido de las necesidades de aprendizaje identificadas en la fase anterior.
- 3) *Resolución de problemas*: Aplicación de los conocimientos recién adquiridos a la resolución de problemas y resumen de lo aprendido.

La mayor parte del proceso de aprendizaje tiene lugar en *grupo*. De este modo, se desarrollan las competencias personales para que los alumnos aprendan a manejar el proceso de cooperación en grupo en todas sus fases.

Se puede observar que el *problema* constituye el punto de partida del proceso de aprendizaje. El problema es “una tarea compleja creada por la necesidad de diseñar, crear, construir, reparar y/o mejorar algo” (Burgess, 2004, p. 42). El *tipo de problema* depende del curso y la organización específicos. Los problemas suelen basarse en estudios de casos de la vida real que han sido seleccionados y editados para cumplir los objetivos y criterios educativos. El *papel del problema* es crucial, ya que determina la dirección del proceso de aprendizaje y hace hincapié en la *formulación* y *resolución* de una pregunta más que en la respuesta. El problema también permite relacionar el contenido del aprendizaje con el *contexto*, lo que favorece la motivación y la comprensión del alumno (De Graaff y Kolmos, 2003). Por lo tanto, la identificación de un “problema estructurado” adecuado es fundamental para la educación en CBPdM a través del PBL y es el objetivo de este trabajo.

2.2. Evaluación del diagnóstico de fallos

Las técnicas de CBPdM proporcionan una evaluación detallada del estado de un sistema (salud) basada en los datos recogidos del mismo a través de la monitorización continua, con la intención de determinar el mantenimiento necesario antes de cualquier fallo previsto (Grall et al., 2002). La *Evaluación del Diagnóstico de Fallos* (FDA) es un subconjunto del CBPdM y se refiere a la detección, el aislamiento y la clasificación de los fallos (Lee et al., 2017).

Los pasos típicos realizados en CBPdM y FDA son (Fig. 1):

- *Análisis de criticidad*: Análisis global del sistema y sus modos de fallo para identificar los componentes críticos en los que se debe realizar el CBPdM, es decir, aquellos con una baja tasa de fallos pero con un alto tiempo de inactividad por fallo (Lee et al., 2009). Generalmente se utiliza el Análisis de Peligros del Proceso (PHA), que comprende diferentes técnicas como el Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (FMECA), el Análisis de Causa Raíz (RCA), etc.
- *Adquisición de datos*: Proceso de selección de señales, sensores y sistemas de adquisición (de datos), y de recopilación de datos útiles de los activos físicos seleccionados. Las señales típicas utilizadas en el CBPdM son las emisiones acústicas, las vibraciones, la corriente, los restos de desgaste y la temperatura (Wang et al., 2006).
- *Recopilación de datos*: Agregación de datos de los sensores instalados en los activos físicos seleccionados.
- *Almacenamiento de datos*: Almacenamiento de los datos recogidos. Deben superarse los retos típicos del campo del Big Data, como el volumen de datos, la integración, la heterogeneidad y la usabilidad (Ardila et al., 2020).
- *Procesamiento de datos*: Herramientas informáticas para convertir los datos en información para el análisis predictivo. Según Lee et al. (2017),

esta fase se divide en:

- o *Preprocesamiento*: Requiere tanto conocimientos del dominio como habilidades de procesamiento de datos para mantener las partes valiosas de los datos recogidos, mientras se eliminan sus componentes no deseados. Las operaciones típicas son:
 - i. *Conversión analógica a digital*: Conversión de la señal detectada en el valor digital de la variable física;
 - ii. *Inspección de la calidad de los datos*: Asegurar la ausencia de errores en el sensor y en la adquisición de datos;
 - iii. *Identificación del régimen*: Necesaria para desarrollar conjuntos de datos de referencia para cada condición de funcionamiento;
 - iv. *Eliminación de anomalías*: Corrección de valores atípicos, valores constantes y valores perdidos;
 - v. *Eliminación de ruido y filtrado*: Necesario para eliminar el ruido de la señal y preservar las características; y
 - vi. *Segmentación*: Subdivisión de los datos en grupos similares para el posterior cálculo de las características. La segmentación se utiliza cuando se espera que la señal cambie con el tiempo, por ejemplo, por degradación mecánica.
- o *Extracción de características*: Extracción de características o indicadores de las señales medidas. Existen numerosos métodos y algoritmos basados en las características de la señal adquirida, por ejemplo: basados en la frecuencia, en los residuos, en el tiempo, en la estadística, etc.
- o *Procesamiento inteligente*: Los modelos basados en datos se utilizan generalmente para estimar y cuantificar el estado de salud (evaluación y diagnóstico de la salud) y para el análisis de pronóstico.
- *Visualización de datos*: Herramientas de visualización fáciles de usar y eficaces para presentar la información de mantenimiento y apoyar el proceso de toma de decisiones.

2.3. Requisitos educativos

Dadas las características del PBL y la FDA, consideramos que un caso de estudio adecuado debe cumplir los siguientes requisitos educativos:

- *Escenario real*: El PBL sugiere el uso de problemas “cerca de la vida real” para motivar a los estudiantes.

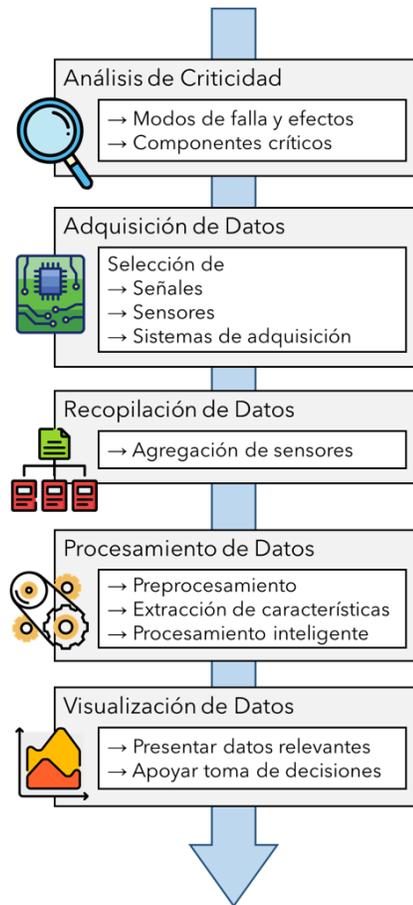


Fig. 1. Flujo de trabajo del CBPdM.

- *Flujo de trabajo del PBL*: El caso de estudio debe permitir la realización de todos los pasos de un proceso de CBPdM; véase la sección 2.2. El análisis de la criticidad es el único paso que puede descuidarse, ya que el PHA suele enseñarse en los cursos tradicionales de ingeniería de mantenimiento.
- *Evaluación*: Aunque el énfasis del PBL está en la formulación y resolución de una pregunta más que en la respuesta, el caso de estudio debe tener métricas objetivas para evaluar la respuesta al problema.
- *Sistema de información (SI)*: El uso de un SI para el almacenamiento de datos facilitaría la interpretación, la usabilidad y el intercambio de las señales y su contexto. Además, un SI personalizado para el CBPdM puede convertirse en una herramienta útil para centralizar y compartir los estudios de casos educativos. Por lo tanto, el SI seleccionado debe implementar una sintaxis y semántica precisas para eliminar la heterogeneidad de los datos (por ejemplo, el uso de diferentes formatos de archivo, estructuras, etc.) y para evitar posibles errores de interpretación.

3. Caso de Estudio del Eje Desbalanceado

El caso de estudio se construyó a partir del banco de pruebas que se muestra en la Fig. 2. Este consiste en un motor de inducción, un volante de inercia y tres rodamientos de bolas. Este banco de pruebas permite simular fallos en los rodamientos, desalineación del eje y cargas desbalanceadas.

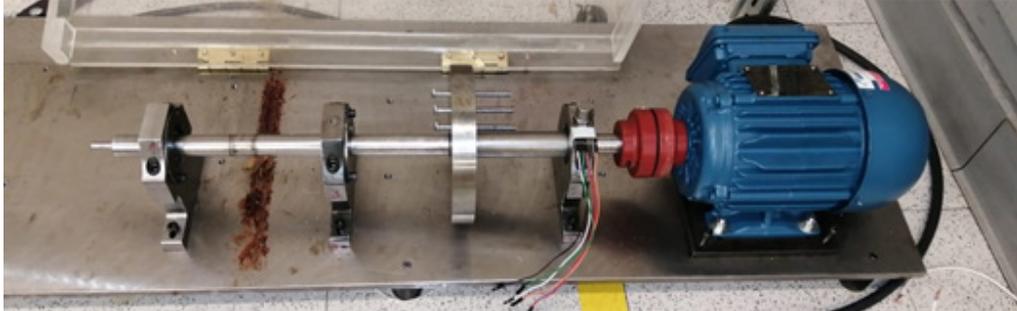


Fig. 2. Banco de pruebas de motores de inducción para la simulación de fallos de la máquina.

El problema propuesto consiste en un *caso de estudio de diagnóstico* que se centra en la clasificación automática de diferentes grados de *desbalanceo*. El desbalanceo se indujo mediante la colocación de tornillos, tuercas y arandelas en el volante. Se simularon cinco estados de desbalanceo como se muestra en la Fig. 3.

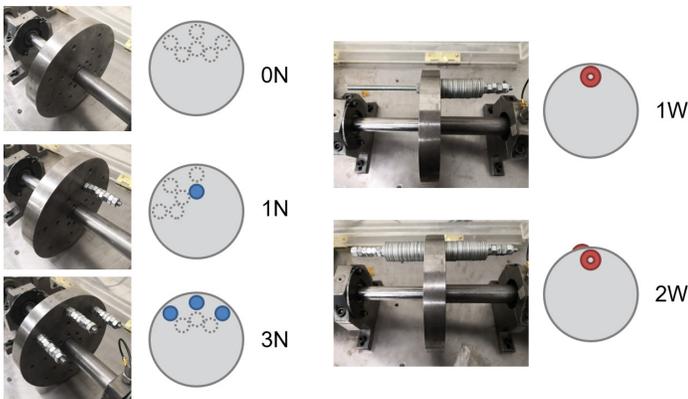


Fig. 3. Estados de desbalanceo simulados: (i) 0N (Cero tornillos), 1N (Un tornillo con tuercas), 3N (Tres tornillos con tuercas), 1W (Un tornillo con tuercas y arandelas), y 2W (Dos tornillos con tuercas y arandelas).

Para cada paso del flujo de trabajo del CBPdM mostrado en la Fig. 1, los estudiantes (i) identificarán las necesidades de aprendizaje, (ii) estudiarán dichas necesidades, y (iii) propondrán e implementarán una resolución. Dado que el banco de pruebas no estará disponible para los estudiantes de las diferentes instituciones, demostrarán la capacidad de recoger y recopilar datos mediante el uso de diferente hardware, por ejemplo, Arduino, etc. A continuación, se descargarán los datos del caso de estudio y se completarán el resto de los pasos utilizando estos datos.

Los estudiantes dispondrán de datos etiquetados y no etiquetados. Los datos etiquetados se utilizarán para la

generación del modelo de clasificación, mientras que los no etiquetados para evaluar la precisión del modelo desarrollado. De hecho, el instructor conocerá el estado de los datos no etiquetados y utilizará esta información para la evaluación. A continuación, presentamos una posible resolución del caso de estudio.

3.1. Adquisición de datos

Dado que el desbalanceo del rotor genera vibraciones en la máquina, se eligió la vibración para inferir el estado de desbalanceo. A continuación, se seleccionó el sensor y el sistema de adquisición en función de diferentes criterios, como la dinámica de los fenómenos físicos, el rango de funcionamiento, la sensibilidad requerida, etc. En este caso de estudio, se colocó un acelerómetro Bruel Kjaer 43962¹ en la parte superior del rodamiento del lado derecho (véase la Fig. 2) y su señal se adquirió a través de un DAQ 9233² utilizando una frecuencia de muestreo de 1000Hz. Se sabe que el desbalanceo genera un valor máximo en la frecuencia del motor. En nuestro caso de estudio, la frecuencia del motor es de unos 28,5Hz (1710rpm). Por lo tanto, la frecuencia de muestreo seleccionada es suficiente para estudiar el fallo de desbalanceo. Se adquirieron 20 muestras de datos para cada estado de desbalanceo, es decir, 100 muestras de datos en total.

3.2. Recopilación de datos

Para cada experimento, los datos se capturaron como señales analógicas y luego se convirtieron en formato digital en un archivo TXT. Este archivo se enriqueció con datos de contexto adicionales (por ejemplo, estado de desbalanceo, etc.) y se guardó como archivo CSV.

- 1 <https://www.bksv.com/media/doc/bp1288.pdf>
- 2 <http://www.ni.com/pdf/manuals/371569d.pdf>

3.3. Almacenamiento de datos

Los datos se separaron en datos *etiquetados* (90 muestras de datos) y *no etiquetados* (10 muestras de datos). Se colocó la misma cantidad de datos para cada estado de desbalanceo en los dos conjuntos. Finalmente, el archivo se subió a XRepo (eXperiments REPOsitory), que es un sistema de información que permite etiquetar, almacenar y descargar selectivamente los datos del CBPdM (Ardila et al., 2020). Los datos de XRepo se almacenan en un formato con una *sintaxis* y una *semántica* precisas y pueden descargarse de forma selectiva, ya que los datos se etiquetan con *etiquetas* y se asocian a una organización, un sistema objetivo y un experimento específicos.

3.4. Preprocesamiento de datos

Los datos se preprocesaron para mantener las partes valiosas de los datos y eliminar sus componentes no deseados. Se realizaron las siguientes operaciones:

- *Conversión de analógico a digital*: Los convertidores A/D adquieren un valor entero que debe ser convertido en voltaje/corriente y eventualmente en el valor de la variable física medida. Las características del convertidor A/D y del sensor deben utilizarse para identificar el factor de conversión. Por ejemplo, la sensibilidad del sensor se utilizó para convertir la tensión en el valor de aceleración correspondiente:

$$\text{Sensibilidad: } 9.89 \frac{mV}{ms^{-2}} \rightarrow Acc \left(\frac{m}{s^2} \right) = \frac{Signal (V)}{0.00989} \quad (1)$$

- *Inspección de la calidad de los datos*: tras una inspección de los datos, observamos que se había producido un error de desplazamiento. En cada muestra de datos, se restó el valor medio de la aceleración a cada elemento para corregir el error de desplazamiento.
- *Identificación del régimen*: los datos detectados presentan un comportamiento transitorio seguido de uno de estado estacionario. Se eliminó el comportamiento transitorio, ya que el desbalanceo puede detectarse mejor en estado estacionario.
- *Eliminación de anomalías*: Las anomalías como los valores atípicos, los valores constantes y los valores faltantes no estaban presentes.
- *Eliminación de ruido y filtrado*: En este caso, el desbalanceo se detecta a unos 28,5 Hz (sección 3.1). Se utilizó un filtro Butterworth con una frecuencia de corte de 200 Hz para eliminar el ruido y mantener las partes valiosas de la señal.
- *Segmentación*: Esta operación no se llevó a cabo porque el caso de estudio de desbalanceo consiste en una señal periódica que no cambia con el tiempo.

3.5. Extracción de características

Como se muestra en el experimento de Yamamoto et al. (2016), el desbalanceo del rotor genera vibraciones que pueden detectarse en (i) el *dominio del tiempo*: oscilaciones directamente proporcionales al estado de desbalanceo, y (ii) el *dominio de la frecuencia*: valor de pico en la frecuencia del motor. Esto también ocurrió en nuestro caso de estudio. Las figuras 4 y 5 muestran, respectivamente, el comportamiento temporal y en frecuencia de los dos estados de desbalanceo extremos, a saber, 0B y 2W. Para sintetizar esta información en características, calculamos la *Raíz Cuadrada Media* (RMS) de las señales en el dominio del tiempo, y la *amplitud* en la frecuencia del motor. El comportamiento frecuencial de las señales se obtuvo mediante la aplicación de la *Transformada Rápida de Fourier*. De este modo, los comportamientos en el dominio del tiempo y de la frecuencia se capturan a través de las dos características seleccionadas.

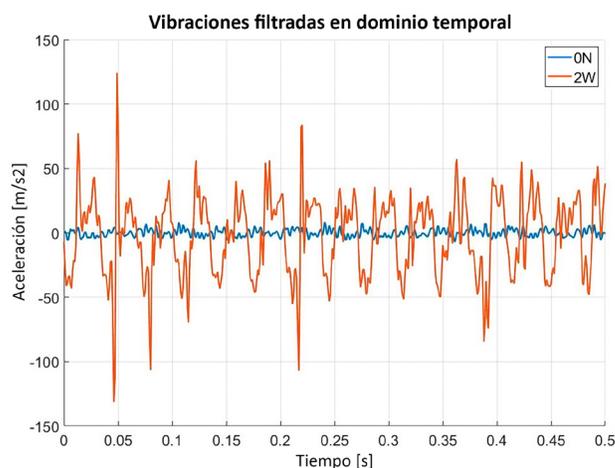


Fig. 4. Respuesta temporal filtrada para los estados de desbalanceo 0N y 2W.

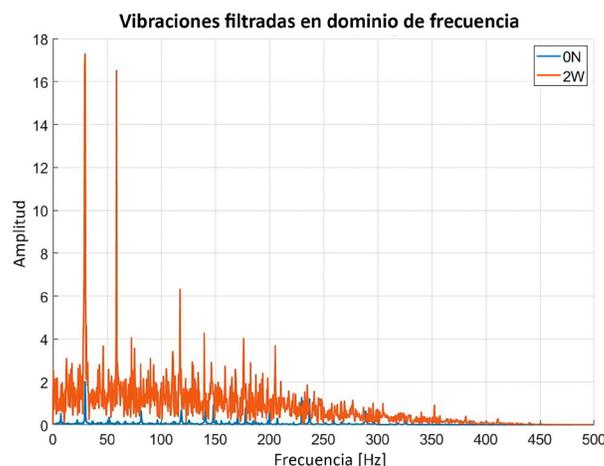


Fig. 5. Transformada rápida de Fourier de la respuesta temporal filtrada para los estados de desbalanceo 0N y 2W.

3.6. Procesamiento inteligente

Dado que se dispone de datos etiquetados, se utilizó el aprendizaje supervisado; Cattaneo et al. (2018). Se implementaron los siguientes pasos típicos de un enfoque de aprendizaje supervisado:

1. *División del conjunto de datos:* las 90 muestras de datos etiquetados se separaron en conjuntos de entrenamiento (70) y de prueba (20). Cada conjunto contenía la misma cantidad de datos para cada estado de desbalanceo. El uso de un conjunto de validación no fue necesario, ya que los hiperparámetros del algoritmo ya estaban disponibles (véase el paso 4).
2. *Selección del algoritmo:* se seleccionó k-nearest neighbours (k-NN) con la distancia euclidiana como métrica de clasificación. Esta distancia constituye una métrica de distancia comúnmente utilizada para las variables continuas, mientras que k-NN es un algoritmo popular de aprendizaje automático para la clasificación.
3. *Selección de la métrica de evaluación:* Se adoptó la puntuación F_1 ya que es ampliamente utilizada en los algoritmos de aprendizaje automático.
4. *Identificación de los hiperparámetros del algoritmo:* Se definieron cinco clusters o grupos, ya que se habían simulado cinco estados de desbalanceo.
5. *Normalización de las características:* las dos características se normalizaron en $[0, 1]$ utilizando el método de normalización min-max para que la contribución de cada característica fuera aproximadamente proporcional.
6. *Identificación de los parámetros del algoritmo:* Los parámetros del algoritmo se identificaron utilizando el conjunto de entrenamiento (véase la Fig. 6). Se puede observar que el uso de las dos características fue necesario para separar adecuadamente los clusters, ya que la amplitud en la frecuencia del motor presenta valores superpuestos entre los diferentes estados de desbalanceo.
7. *Evaluación del algoritmo:* La evaluación de la puntuación F_1 utilizando el conjunto de pruebas. Se obtuvo una puntuación F_1 de 1, mostrando la precisión perfecta alcanzada del modelo entrenado.
8. *Uso del algoritmo en datos desconocidos:* El conjunto de evaluación (es decir, los datos no etiquetados) se introdujo en el algoritmo para la clasificación de datos. De nuevo, se obtuvo una puntuación F_1 de 1.

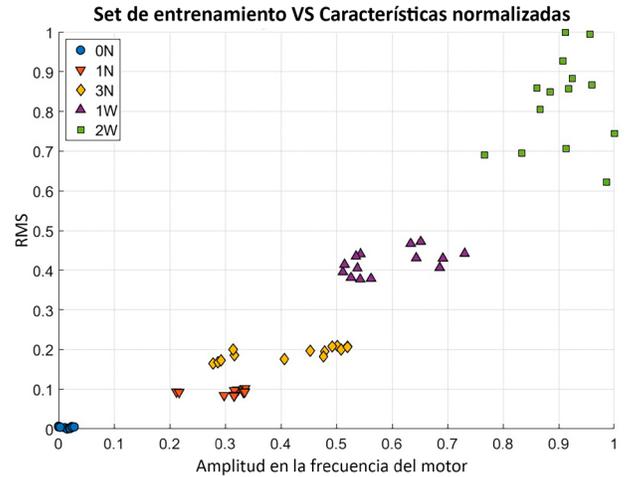


Fig. 6. Representación del conjunto de entrenamiento con respecto a las características normalizadas. Se adoptan diferentes colores y formas para cada clúster.

3.7. Visualización de los datos

En el CBPdM, la visualización de datos es relevante cuando se deben desarrollar sistemas de apoyo a la decisión. Dado que el problema sólo se ocupa de la clasificación de los fallos y no de la toma de decisiones, la visualización de datos no fue necesaria.

4. Resultados y Discusiones

A continuación, verificamos que el caso de estudio propuesto cumple con los requisitos educativos identificados en la sección 2.3:

- *Escenario real:* Los motores de inducción son el centro de la gran mayoría de los procesos industriales y se estima que el 5% de los fallos en el rotor del motor se deben al desbalanceo; Bonnett y Soukup (1992). Por lo tanto, el caso de estudio propuesto representa un problema “cercano a la vida real”.
- *Flujo de trabajo CBPdM:* El caso de estudio permite la implementación de todos los pasos de un proceso CBPdM con la única excepción del análisis de criticidad y la visualización de datos. La definición de casos de estudio que incluyan también estos pasos será objeto de futuros trabajos.
- *Evaluación:* El conjunto de evaluación se introduce en el modelo de clasificación y el instructor compara los resultados del modelo con el estado de desbalanceo real. La puntuación F_1 se utiliza para evaluar objetivamente la respuesta al problema.
- *Sistema de información:* XRepo implementa una sintaxis y semántica precisas, y almacena los datos en una estructura ordenada. Además, los datos pueden ser filtrados por criterios mostrando el potencial de convertirse en una herramienta para centralizar y compartir casos de estudio educativos en CBPdM.

Finalmente, nos gustaría destacar dos creencias comunes que ha traído la era digital moderna, y que deberían ser desmitificadas cuando se enseña CBPdM:

1. “El conocimiento del dominio no es necesario cuando se utilizan modelos basados en datos”: Teniendo en cuenta los pasos del proceso de CBPdM (sección 2.2), se puede observar que 7 de los 8 pasos requieren conocimiento del dominio, mientras que el modelado basado en datos sólo se utiliza en el paso de procesamiento inteligente. Además, en este caso de estudio también podríamos clasificar los estados de desbalanceo “manualmente”, ya que los datos desconocidos se colocan en el clúster correspondiente; véase la Fig. 7. Queremos subrayar este concepto, ya que hoy en día cada vez más estudiantes creen que los modelos basados en datos pueden utilizarse sin el apoyo del conocimiento del dominio relativo al proceso. Sin embargo, los modelos basados en datos son herramientas poderosas que deben trabajar junto con el conocimiento del dominio.

2. “Todos los problemas de mantenimiento pueden resolverse con sensores y modelos basados en datos”: La decisión de una política de mantenimiento para un determinado activo físico debe comenzar siempre con un análisis de criticidad. El CBPdM no siempre es la respuesta, ya que introduce muchas complejidades y costes. En la mayoría de los casos, las estrategias de mantenimiento tradicionales, como el rediseño y el mantenimiento correctivo y preventivo, pueden generar más beneficios que el CBPdM (Lee et al., 2009).

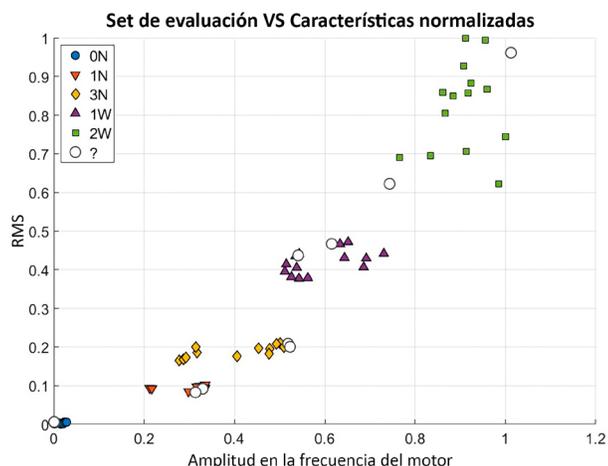


Fig. 7. Representación del conjunto de evaluación con respecto a las características normalizadas. Se utiliza un círculo blanco para cada dato del conjunto de evaluaciones.

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ilustra un caso de estudio para la educación en FDA utilizando el enfoque PBL. El caso de estudio consiste en un problema “cercano a la vida real”, y se demuestra que este permite la implementación de la mayoría de los pasos de un flujo de trabajo CBPdM y la evaluación de la respuesta a través de métricas objetivas. El caso práctico muestra la integración entre el conocimiento del dominio y los modelos basados en datos, lo que subraya el papel fundamental que desempeña el conocimiento del dominio en la aplicación del modelado basado en datos. Finalmente, el caso de estudio se almacena en XRepo, un sistema de información que, según nuestra visión, tiene el potencial de convertirse en una herramienta para centralizar y compartir problemas educativos en CBPdM.

Los datos del caso de estudio se ponen a disposición del lector³. Aunque los datos se hayan subido a XRepo, se utiliza una plataforma diferente para su divulgación, ya que XRepo es un trabajo en curso y aún necesita algunas mejoras.

A lo largo del documento se han identificado algunos trabajos futuros, que se resumen a continuación:

- *Caso de Estudio para la Selección de Políticas de Mantenimiento*: La decisión más difícil en ingeniería de mantenimiento es la selección de una política de mantenimiento adecuada para un determinado activo físico. La definición de un caso de estudio para la selección de la política de mantenimiento adecuada basada en los resultados de un análisis de criticidad sería útil en la enseñanza de la ingeniería de mantenimiento.
- *Control de Acceso Granular para XRepo*: Actualmente, cualquier usuario puede modificar y acceder a toda la información almacenada, aunque no sea el propietario de los datos. XRepo debería restringir la modificación de la información y proporcionar diferentes niveles de acceso de lectura; por ejemplo, estudiantes, profesores, etc.

3 Los datos de los casos de estudio se ponen a disposición del lector (archivo *.zip): https://www.researchgate.net/publication/341220576_Dataset_A_Case_Study_for_Problem-based_Learning_Education_in_Fault_Diagnosis_Assessment

Referencias

- Ardila, A.; Martínez, F.; Garces, K.; Barbieri, G.; Sanchez-Londoño, D.; Caielli, A.; Cattaneo, L. and Fumagalli, L. (2020). "XRepo – Towards an Information System for Prognostics and Health Management Analysis". *Procedia Manufacturing* 42:146-153.
- Barrows, H.S. (1984). "A Specific Problem-based, Self-directed Learning Method Designed to Teach Medical Problem-Solving Skills, and Enhance Knowledge Retention and Recall". *Tutorials in Problem-based Learning*, pp. 16-32.
- Bonnett, A.H. and Soukup, G.C. (1992). "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-phase Squirrel-cage Induction Motors". *IEEE Trans. on Industry Applications*, 28(4):921-937.
- Burgess, K.L. (2004). "Is your Case a Problem?". *Journal of STEM Education: Innovations and Research*, 1/2:42-44.
- Cattaneo, L.; Fumagalli, L.; Macchi, M. and Negri, E. (2018). "Clarifying Data Analytics Concepts for Industrial Engineering". *IFAC-PapersOnLine*, 51(11):820-825.
- De Graaf, E. and Kolmos, A. (2003). "Characteristics of Problem-based Learning". *Int'l. J. Engineering Education*, 19(5):657-662.
- Grall, A.; Bérenguer, C. and Dieulle, L. (2002). "A Condition-based Maintenance Policy for Stochastically Deteriorating Systems". *Reliability Engineering & System Safety*, 76(2):167-180.
- Heng, A.; Zhang, S.; Tan, A.C. and Mathew, J. (2009). "Rotating Machinery Prognostics: SOTA, Challenges and Opportunities". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3):724-739.
- Hsieh, C. and Knight, L. (2008). "Problem-based Learning for Engineering Students: An Evidence-based Comparative Study". *The Journal of Academic Librarianship*, 34(1):25-30.
- Jardine, A.K.; et al. (2006). "A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-based Maintenance". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7):1483-1510.
- Lee, J.; et al. (2017). "Introduction to Data-driven Methodologies for Prognostics and Health Management". *Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems*, pp. 9-32, Springer.
- Lee, J.; et al. (2009). "Informatics Platform for Designing and Deploying Manufacturing Systems". *Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing*, pp. 1-35, Springer, London.
- Li, R., Verhagen, W.J. and Curran, R. (2020). "A Systematic Methodology for Prognostic and Health Management System Architecture Definition". *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106598.
- Martin, K.F. (1994). "A Review by Discussion of Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Machine Tools". *Int'l. J. Machine Tools and Manufacture*, 34(4):527-551.
- Mills, J.E. and Treagust, D.F. (2003). "Engineering Education - Is Problem-based or Project-based Learning the Answer". *Australian J. Engineering Education*, 3(2):2-16.
- Park, K.S. (1993). "Condition-based Predictive Maintenance by Multiple Logistic Function". *IEEE Transactions on Reliability*, 42(4):556-560.
- Perrenet, J.C.; Bouhuijs, P.A.J. and Smits, J.G.M.M. (2000). "The Suitability of Problem-based Learning for Engineering Education: Theory and Practice". *Teaching in Higher Education*, 5(3):345-358.
- Savery, J.R. and Duffy, T.M. (1995). "Problem-based Learning: An Instructional Model and its Constructivist Framework". *Educational Technology*, 35(5):31-38.
- Savery, J.R. (2006). "Overview of Problem-based Learning: Definition and Distinctions". *Interdiscip. J. of PBL*, 1(1):9-20.
- Strobel, J. and Van Barneveld, A. (2009). "When is PBL More Effective? A Meta-Synthesis of Meta-analyses Comparing PBL to Conventional Classrooms". *Interdiscip. J. of PBL*, 3(1):44-58.
- Wang, L. and Gao, R.X. (Eds.) (2006). "Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing". Springer.
- Yadav, A.; Subedi, D.; Lundeberg, M.A. and Bunting, C.F. (2011). "Problem-based Learning: Influence on Students' Learning in an Electrical Engineering Course". *J. of Eng. Educ.*, 100(2):253-280.
- Yamamoto, G.K.; da Costa, C. and da Silva Sousa, J.S. (2016). "A Smart Experimental Setup for Vibration Measurement and Unbalance Fault detection in Rotating Machinery". *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, 4:8-18.



Smart and Connected Maintenance: from Local Retrofitting to Global Services in Maintenance and Asset Care Management

Academic and Industrial Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology (AMEST'22)

1st AMEST Workshop to be hosted in Latin America

Share your innovative digital solutions and their implementation, your journey towards digitalization, the challenges and opportunities in the area of maintenance and asset management:
<https://amest2022.uniandes.edu.co/call-for-industry-abstract/>

Contact us if you want to be involved in the organization and support of the event:
amest@uniandes.edu.co

For more information: **<https://amest2022.uniandes.edu.co/>**

Organized by:



Supported by:



Media Partner:



Cálculo de reducción de costos por filtración de aceites



José Páramo

Presidente y Fundador
de Grupo Techgnosis.

joseparamo@grupo-techgnosis.com

www.grupo-techgnosis.com



Explicación Teórica

- Fabricantes de Equipo Original (OEM'S) tales como: SKF, CATERPILLAR, VICKERS, PARKER, REXROTH, BOSCH, etc., coinciden en asegurar que la contaminación de los lubricantes representa una de las principales causas de desgaste de la maquinaria. En el caso de algunos de ellos, se menciona en sus folletos, web sites, videos corporativos, etc., que la contaminación con partículas abrasivas en el aceite es hasta el 80% de la causa raíz de falla de los equipos, por tanto, la purificación periódica del aceite mediante la filtración representa una acción efectiva para reducir el desgaste de la maquinaria, incrementar la vida del aceite lubricante y aumentar la confiabilidad de su planta.

Software de Cálculo

Abrir [archivo adjunto](#) en Excel

Instrucciones:

- Paso #1: Capturar el número de máquinas (A).
- Paso #2: Capturar el número de horas de operación por año (B).
- Paso #3: Capturar el % de disponibilidad actual (C).
- Paso #4: Capturar el costo de paro por hora (D).

El programa calcula con tal información los costos totales de paro (E):

Nota: $E=A \times B \times [(100-C/100)] \times D$

- Paso #5: Capturar el % de fallas hidráulicas.

NOTA: Típicamente se usa un 35%, pero tal valor podrá fijarlo usted, de acuerdo a los registros particulares y específicos de su planta.
NOTA: De estas fallas hidráulicas, el 80 % son debidas a la contaminación y el 20% por otros factores (I).

Se obtiene entonces la reducción de costos obtenida por la filtración del aceite (J), asumiendo que aquella es al menos 95% efectiva.



Ejemplo de aplicación práctica

Llenar celdas en amarillo:

- Paso #1: 14 (número de máquinas).
- Paso #2: 7608 (Horas de operación por año).
- Paso #3: 92% (Disponibilidad actual de estas máquinas).
- Paso #4: 80 USD (Costo de paro por hora).
- Paso #5: 35% (Fallas hidráulicas).

Ahorros totales: \$181,326.03 USD /AÑO

Referencias

- Libro RCT III -Cálculo de ahorros tribológicos publicado por Techgnosis International, S.A. de C.V. Autor: José Páramo.
- Libro Practical Lubrication for Industrial Facilities, publicado por: The Fairmont Press, Inc. y Marcel Dekker. Autor: Heinz P. Bloch.
- Website: www.hydacusa.com Empresa: HYDAC.

PRECONLUB



CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO, CONFIABILIDAD Y LUBRICACIÓN DE CLASE MUNDIAL 21 Y 22 DE OCTUBRE



PROGRAMA PRECONLUB 2021

JUEVES 21 OCTUBRE

9:30 - 9:45

Bienvenida a cargo de José Páramo

9:45 - 10:30

Gestión Tribológica de Activos

10:30 - 11:15

Lubricantes de cogeneración

11:15 - 11:45

Networking

11:45 - 12:30

IoT y la Gestión de Activos, Cloud-first,
para darle paso a Cloud-only

12:30 - 13:15

Alineación, Metodología EFD

14:15 - 15:15

Mantenimiento en tu Telefono + Business
Intelligence - Prisma 2 en 1

15:15 - 16:00

Reliability 4.0: Where You Should Be in
2021 & Beyond

16:00 - 16:30

Networking

16:30 - 17:15

Innovando y co-creando lubricantes del
futuro, hoy

17:15 - 18:00

Proyecto de Mejora de un sistema
computarizado de Gestión de
Mantenimiento según la ISO 14224

VIERNES 22 OCTUBRE

9:30 - 10:15

Digitalización de los procesos de Mant.
tecnología para la industria 4.0

10:15 - 11:00

Monitoreo Objetivo, la clave para una
Lubricación consciente

11:00 - 11:45

¿Por qué autolubricar?

12:15 - 13:00

OAMLMA= Aporte de la mujer WAM 21
(Woman in Automotive maintenance 21st
Century) a la industria del mantenimiento
automotriz

14:00 - 14:45

El Gemelo Digital para mantenimiento
industrial de equipos

14:45 - 15:30

Confiabilidad conectada, el futuro del
mantenimiento

15:30 - 16:15

Soluciones de Lubricación y Monitoreo para
Cadenas Transportadoras

16:15 - 16:45

Networking

16:45 - 17:30

La Digitalización Industrial y la confiabilidad
de las máquinas eléctricas

Conoce todos los eventos en
<https://www.preconlub.website>

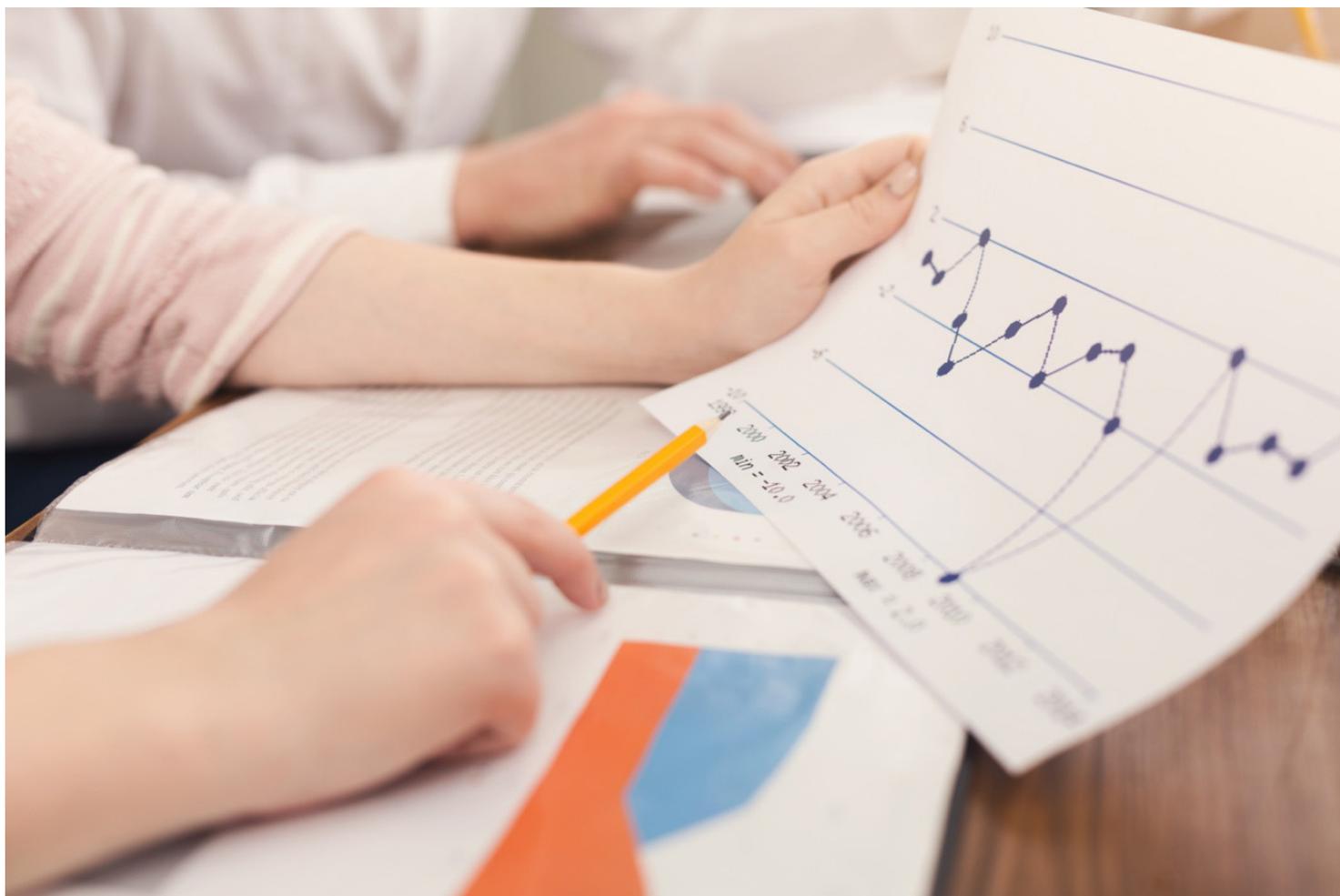
¡Contáctanos!



fractal



¿Qué implica la mejora continua en la gestión de activos?



Implementar un proceso de mejora continua en la gestión de nuestros activos permite mejorar el rendimiento de la compañía a nivel macro.

¿Qué implica la mejora continua en la gestión de activos?

Toda empresa requiere de activos productivos que permitan llevar a cabo las operaciones cotidianas, y así cumplir con los compromisos adquiridos con clientes y proveedores. Para maximizar su uso y optimizar los recursos, es necesario adoptar un enfoque de **mejora continua** que permita potenciar el rendimiento de los procesos.

¿Qué es la mejora continua y cómo se relaciona con el mantenimiento de activos?

La mejora continua se enmarca en el [Lean Maintenance](#), cuyo principal objetivo es ser **proactivos en la mantención y gestión de activos**, evitando que se desperdicien recursos como energía, tiempo o combustible, lo que deriva en una mejora de todos los flujos de trabajo. El Lean Maintenance está muy relacionado con el término japonés Kaizen, el cual propicia el proceso de mejora continua en lo que a mantención de activos respecta. Ambos se apoyan en herramientas como el proceso 5S (separar, ordenar, limpiar, estandarizar y replicar el proceso a otras áreas) y el Mantenimiento Productivo Total (TPM), gracias a los cuales es posible adoptar un enfoque preventivo y proactivo en lo que a gestión de activos respecta.



TPM: clave en la mejora continua

La iniciativa del mantenimiento productivo total se enfoca en eficiencia y rendimiento. Reduce costos e incrementa la disponibilidad de los activos, al tiempo que busca eliminar las roturas, defectos y accidentes.

En respuesta a ello, el TPM propone los siguientes puntos como eje de toda estrategia de mantenimiento:

- **Formación y adiestramiento.** Ofrecer capacitaciones para que los usuarios de un activo puedan darle mantenimiento rutinario e identificar problemas emergentes.
- **Mantenimiento autónomo.** Asegurarse de que los usuarios de un equipo puedan limpiarlo e inspeccionarlo. Fomenta su toma de responsabilidad en cuanto al activo.

Mantenimiento planificado. [Tras estudiar los indicadores claves](#) de cada activo -como Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF), y Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF)- se programan tareas de mantenimiento.

- **Mantenimiento de calidad.** Es preciso concertar un mantenimiento efectivo que se base en análisis de causa raíz, para así eliminar las fuentes de defectos recurrentes.
- **Manejo temprano del equipo.** El mantenimiento se volverá más robusto debido a que los usuarios del equipo están involucrados desde su concepción.

87% de trabajadores dicen que el mantenimiento preventivo reduce las fallas en maquinaria y el tiempo perdido de producción, dando cuenta de la relevancia que tiene para el cotidiano operacional de empresas de diversos sectores.

¿Con qué estrategias de mantenimiento encaja la mentalidad Kaizen?

Las principales son:

- **Estrategia de Alta Disponibilidad.** Se hacen mantenimientos generales que afecten poco a la producción y así garanticen el mayor funcionamiento continuo posible.
- **Estrategia sistemática.** Se hacen intervenciones programadas para cambiar componentes y lubricar cada cierto tiempo.
- **Estrategia de Alta Disponibilidad y Confiabilidad.** Se busca la mayor disponibilidad al concertar análisis de ingeniería de confiabilidad que indiquen dónde reparar.

Al realizar mantenimientos constantes y revisiones rutinarias, es posible mejorar el equipo paulatinamente, permitiéndonos estar preparados ante cualquier eventualidad. Si quisiéramos definir qué es la mejora continua con dos palabras podríamos decir: **perfección gradual**.

No obstante, para tener un panorama completo del estado de nuestros equipos a mejorar y potenciar la gestión de activos se requieren mediciones y monitoreos extraídos en tiempo real. Aquí, es indispensable contar con **un software de gestión de mantenimiento**.

¿Cómo potenciar el proceso de mejora continua con un software GMAO?

Un software GMAO monitorea los activos en tiempo real. Recopila, procesa y genera reportes para el correcto análisis, facilitando así la toma de decisiones. Sin embargo, no solo permite realizar mantenimientos en el momento adecuado, sino que tendremos los datos necesarios para implementar mejoras en las áreas en las que operan dichos activos.

Referencias

1. www.fracttal.com/es/.../mantenimiento-lean-mejora-continua
2. www.ingenieriaindustrialonline.com/gestion-y-control-de-calidad/kaizen-mejora-continua
3. institutolean.cl/nuevo/.../proposito-5s
4. economipedia.com/definiciones/proceso-de-mejora-continua.html
5. www.leanproduction.com/tpm
6. www.fracttal.com/es/.../disponibilidad-confiabilidad-indicadores-gestion-mantenimiento
7. www.plantservices.com/articles/.../how-kaizen-can-guide-your-post-covid-cleaning-protocols
8. www.reliableplant.com/root-cause-analysis-31548
9. www.itseller.cl/2020/.../el-internet-de-las-cosas-o-iiot-y-su-acelerada-adopcion-en-chile
10. www.fracttal.com/es/.../gmao-software-de-gestion-de-mantenimiento-para-optimizar-tus-activos
11. www.retema.es/noticia/fracttal-cierra-inversion-de-us-5-3-millones-para-transformar-el-mantenimiento-del-fu-X3ylG



Equipo Fractal
Marketing.chile@fracttal.com
www.fracttal.com





Programa
Referidos Fractal



fractal

¡Refiere Fractal y obtén ingresos extra!

Tus clientes, seguidores y amigos, podrán optimizar su gestión de activos gracias a la tecnología aplicada al mantenimiento con nuestros productos como Fractal One, Fractal X y Predictto.

Por cada nuevo cliente de Fractal que envíes mediante el enlace de referencia, te pagaremos al menos un 10% del monto del primer año de suscripción pagado.



Recomienda Fractal
a tus colegas y amigos



Gana el **10%**
por venta concretada

Para mayor información visita

www.fractal.com

¿Cómo serán las fábricas dentro de una década?

La transformación progresiva hacia la Smart Factory





Toni Laserna García

Experto en Transformación
Digital en la Industria.

tlaserna@logikaservices.com

<https://aplitechnosis.website/>



Capítulo 2*

Aprovisionamiento de materias primas

En 2010 nació la generación *alpha* (α), la segunda completamente digital junto con la Z. Los futuros consumidores no habrán conocido otra forma de comunicarse ni trabajar que no sea esa, ni la aceptarán. Actualmente estamos frente a un cliente cada vez más digitalizado que está causando la revolución en las Cadenas de Suministro, “obligándolas” a digitalizar y conectar todos sus eslabones, ofreciéndole 100% trazabilidad,

transparencia y visibilidad, información a tiempo real, etc. La compra online, con plataformas eCommerce cada vez más potentes, así como las campañas de Marketing tipo “Black Friday”, condicionan que sean las fábricas y centros logísticos el factor limitante de venta; es decir, los activos que limitan la CAPACIDAD y FLEXIBILIDAD asumible. Y de ahí que todo lo que sea implementar tecnologías de la Industria 4.0 en tales centros para

aumentar sus prestaciones, son bienvenidas.

Se puede hablar del concepto **Digital B2B2C**, en el caso de una pequeña cadena de suministro formada por un proveedor inicial que entrega al nivel 1 y este es quien genera la venta directa al consumidor/cliente. Por tanto, en función del tamaño de la cadena, definiríamos B2B2B... B2C, siendo el número de “B’s” los proveedores que forman los eslabones de la cadena.

*Hoy en día se habla mucho de evolucionar la SCM a **Cadena de Valor**, eliminado toda “B” que no aporta nada o muy poco y con ello, reducir la distancia del consumidor (C) con el que le genera el producto/servicio (el valor). Esta tendencia explica por qué el 30% de pymes va a desaparecer, por cuantificar un porcentaje medio, empresas que están en eslabones de poco valor y “alejadas” del consumidor final.*

* El Capítulo 1 se puede leer en la Edición 37, la cual se puede descargar [aquí](#).



En este capítulo expondremos una serie de oportunidades de mejora que demanda el sector de la estampación automoción, agrupadas en tres grandes bloques que tienen estrecha relación con los proveedores de Materia Prima:

1. Todo lo que tiene que ver con la **PLANIFICACIÓN Y CONTROL**

- Planificación de todos los recursos: MP, contenedores, plantilla...
- Secuenciación ágil y eficiente de los pedidos. Posibilidad de simular escenarios ante imprevistos.
- Alineación de la planificación de las entregas desde el plan inicial.
- Trazabilidad online y real time. Anticipación gracias a la predicción.

2. Todo lo que tiene que ver con el **APROVISIONAMIENTO DE MATERIA PRIMA**

- Procedimientos manuales: trámites lentos, papel, errores humanos.
- Mejorar el control de la calidad en la recepción de la MP.
- Trazabilidad de la MP desde su origen (la fábrica del proveedor MP).
- Sincronizar los aprovisionamientos del Proveedor con la producción del estampador.

3. Todo lo que tiene que ver con la **CALIDAD**

- Gestión calidad en todo proceso completo.
- Seguimiento por lote y por pieza unitaria.
- Trazabilidad desde la MP hasta la pieza estampada PA (producto acabado).

Detallemos un poco más las dos primeras oportunidades de mejora que tienen los estampadores en esta nueva década 2020.

Planificación y control

El inicio de la planificación del estampador es la demanda de los clientes finales (por lo general, OEM'S), que generarán los pedidos a la planta. Estos "disparan" la planificación de todos los recursos del estampador, destacando las materias primas, los operarios, los contenedores y por descontando, la línea de prensas y las matrices.

Hoy en día, la planificación cada vez plantea situaciones más complejas, con múltiples

consideraciones como la MP en diferentes formatos, contenedores homologados para las piezas, operarios capacitados y habilitados.

Y se requiere mayor agilidad y flexibilidad en la secuenciación de pedidos, pues son cada vez más frecuentes los cambios de última hora en la demanda. La posibilidad de hacer un seguimiento online de los principales KPI's la producción, y retroalimentando en real-time las opciones de planificación.

Aprovisionamiento de materia prima

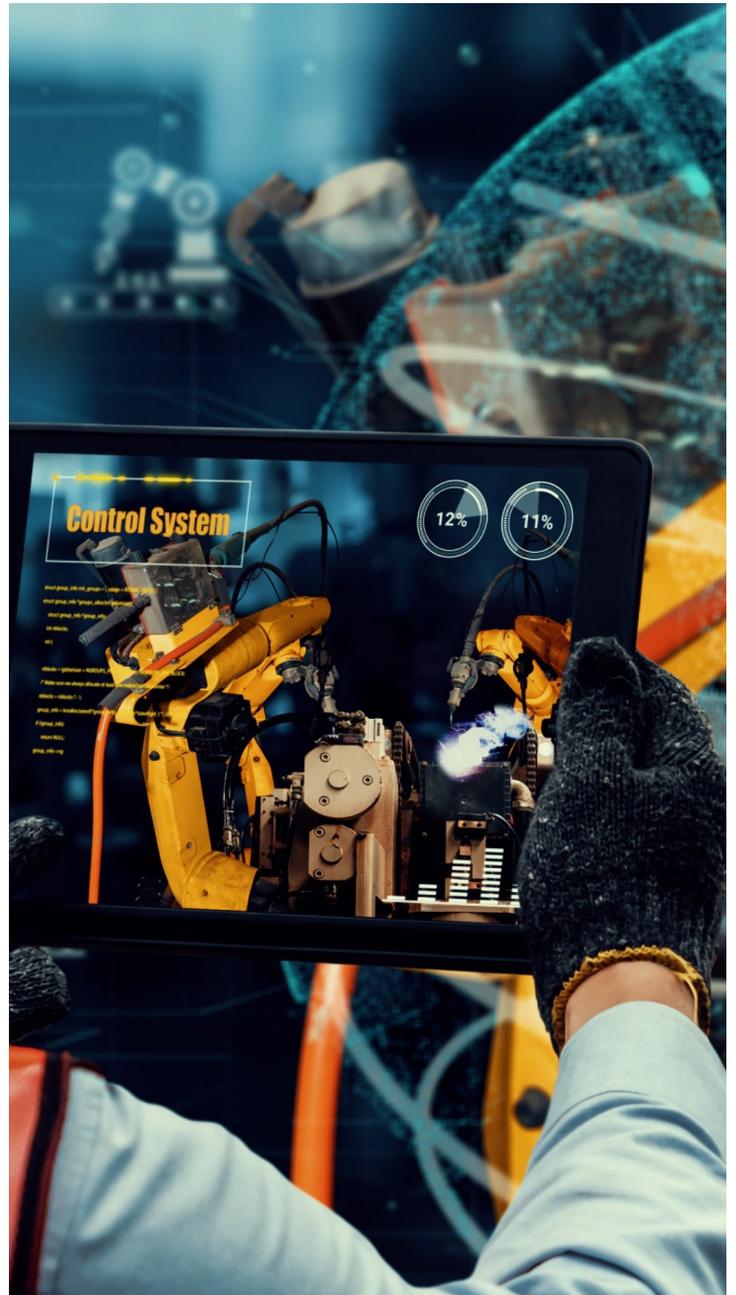
Las tareas de recepción son mayoritariamente manuales y consumen grandes cantidades de papel, que pueden comportar errores que impactan en todo el flujo "aguas abajo". Además, implican "tiempos de espera" entre la recepción física de materiales y su registro informático.

Sería interesante disponer de un control online y sin errores de los inventarios de materia prima.

Por otra banda, los clientes de los estampadores cada vez son más exigentes en cuanto a conocer la trazabilidad de la materia prima.

Y, por último, se necesita incrementar la integración online con proveedores, sincronizando el aprovisionamiento y teniendo en cuenta la situación real de producción.

Si analizamos estos 3 grandes bloques desde la perspectiva de las tecnologías 4.0 y tendencias en la SCM, se trata de evolucionar la relación Cliente-Proveedor de aceros hacia el desarrollo de una **CADENA DE VALOR ÁGIL, CONECTADA E INTELIGENTE**. Estableciendo nuevas relaciones de fidelización del proveedor de Materia Prima con los estampadores, basadas en **formato digital**.

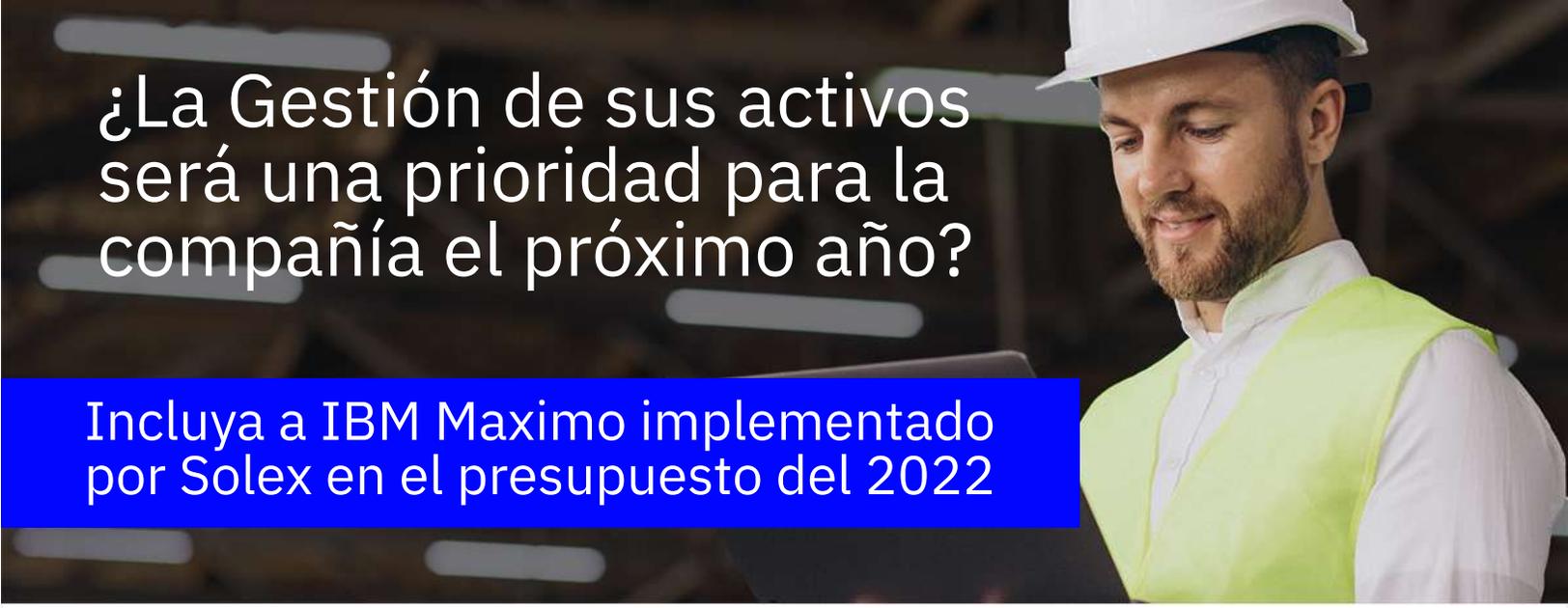


"No se trata de CÓMO SE FABRICA sino de CÓMO SE SIRVE A LOS CLIENTES".

Y en este sentido, los podemos agrupar en dos grandes retos tecnológicos:

1) Relacionado con la LOGISTICA INBOUND: el propio suministro físico (por lotes, etc.), la planificación y programación_fina cliente-proveedor, los sistemas de comunicación, Trazabilidad-geolocalización de inicio a fin (incluyendo transporte) Online/Tiempo_real, etc.

2) Relacionado con la FICHA DIGITAL DEL PRODUCTO: la información de los productos suministrados. Todo lo que tiene que ver con el certificado de materiales, su composición y sus propiedades mecánicas de cada bobina o lote de fabricación de formatos. En formato digital en Online/Tiempo_real.



¿La Gestión de sus activos será una prioridad para la compañía el próximo año?

Incluya a IBM Maximo implementado por Solex en el presupuesto del 2022

Sabemos la importancia de la **Gestión de Activos** y mantenimiento para su negocio. **Solex** apoya hace más de 25 años la implementación de **IBM Maximo** el **EAM** líder mundial.

Lo invitamos a conversar acerca de:

- Implementación de **Maximo** a la medida de sus necesidades.
- Alineación con la **ISO 55000** del ciclo de vida completo de los activos.
- Gestión del Cambio Organizacional en la implementación de **Maximo**, alineado a la **Gestión de Activos**.
- Soporte y servicios posteriores a la implementación.

Escríbanos a info@solex.biz y programe una sesión estratégica de 30 minutos para hablar de sus necesidades.



Integración de la Termografía Infrarroja

como técnica del Mantenimiento Predictivo en el diagnóstico de condiciones de compresores recíprocos



Odlanier José Mendoza Mayorga

Ingeniero Mecánico.

Especialista en el Análisis / Diagnostico de Condiciones de Equipos Reciprocantes.

odlaniermendoza@gmail.com



El análisis de condiciones en equipos reciprocantes representa un reto interesante para la operación y el mantenimiento; y con mayor responsabilidad para el ingeniero CBM; debido a la complejidad de estos equipos, en cuanto a su conformación interna, los diversos sistemas que lo conforman y la variabilidad operacional con que pueden operar; es por ello que, en gran medida, la efectividad en los diagnósticos depende de la correcta integración de las diferentes técnicas del mantenimiento predictivo. Es imperativo saber los tipos de fallas que se pueden detectar con cada técnica aplicada o cuales y como se deben integrar diferentes técnicas para poder detectar otros tipos de fallas.

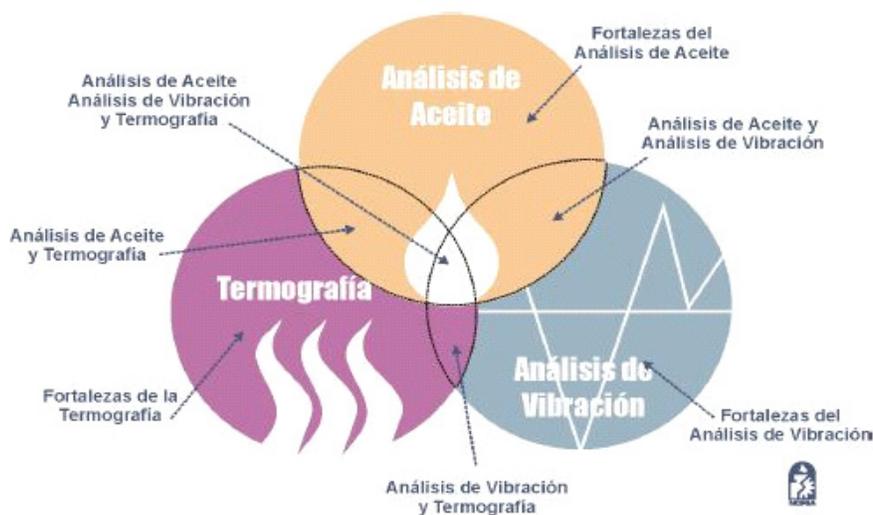


Figura 1. Principales Técnicas del Mantenimiento Predictivo.

Fuente: Maxwell H. & B. Johnson - "Integration of Lubrication and Vibration analysis technologies" - Palo Verde Nuclear Generations Station.

Las técnicas del mantenimiento predictivo más importantes en cuanto a aplicabilidad para el diagnostico de condiciones en equipos reciprocantes son:

- Análisis de vibraciones.
- Análisis de aceite.
- Termografía.

Aunque no está definida como una técnica del mantenimiento predictivo; el análisis de rendimiento es una herramienta importante para el diagnóstico de condiciones en motores de combustión interna (en los casos que cuente con las facilidades para realizar registros de presión) y en compresores recíprocos.

A pesar de que el análisis de vibraciones integrado al análisis de rendimiento y el análisis de aceite constituyen las técnicas principales para el diagnóstico de condiciones en equipos recíprocos; no todos los tipos de fallas que se pueden dar en este tipo de equipos son detectables o fácilmente detectables con el uso e

integración de las técnicas mencionadas; he aquí donde la técnica de termografía infrarroja integrada al monitoreo de condiciones de equipos recíprocos, proporciona soporte adicional e incrementa los tipos de condiciones detectables y diagnosticables.

La termografía Infrarroja conceptualmente está definida como: “la técnica de producir una imagen visible a partir de radiación infrarroja invisible (para el ojo humano) emitida por objetos de acuerdo con su temperatura superficial. La energía que las máquinas emiten desde su superficie viaja en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz; esta energía es direc-

tamente proporcional a su temperatura, lo cual implica que, a mayor calor, mayor cantidad de energía emitida. La cámara termografía es la herramienta que realiza esta transformación”.

Si bien es cierto que, la termografía infrarroja está catalogada como una de las principales técnicas del mantenimiento predictivo; también es cierto que el desarrollo y aplicabilidad de esta ha tenido mayor afinidad en el área eléctrica sobre el área mecánica, y más aún en equipos recíprocos. Es por ello que lograr integrar esta técnica, de manera efectiva, constituye un desafío interesante que en gran medida depende del conocimiento sobre la

constitución de cada sistema del equipo, del contexto operativo y de cómo se manifiestan los mecanismos de falla.

Como profesional en el análisis / diagnóstico de condiciones de equipos recíprocos, el desarrollo del presente artículo tiene como finalidad dar a conocer, con los soportes técnicos pertinentes, cómo realizar la integración de la termografía infrarroja en el diagnóstico de condiciones de compresores recíprocos; siendo de los diagnósticos más representativos, la detección de falla por **fuga de gas a través de caja de empaquetadura de los cilindros compresores**.

Funcionamiento del sistema de la caja de empaquetadura

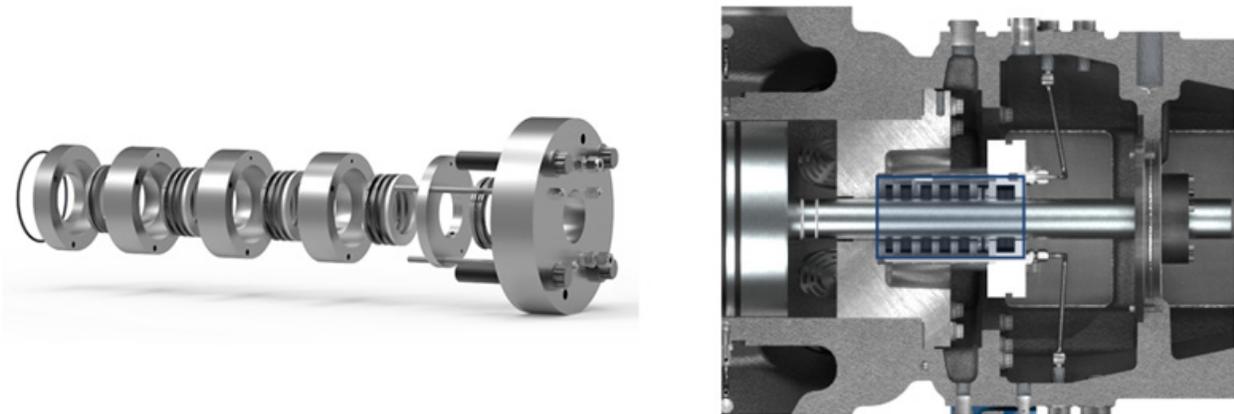


Figura 2. Caja de Empaquetadura - Cilindro Compresor.
Fuente: Curso básico de compresores Ariel.

Para tener una mejor comprensión de cómo se realiza el diagnóstico de fuga de gas a través de la caja de empaquetadura mediante la aplicación de la termografía infrarroja; es imperativo conocer cómo funciona este sistema, es por ello que a continuación se describirá de forma resumida.

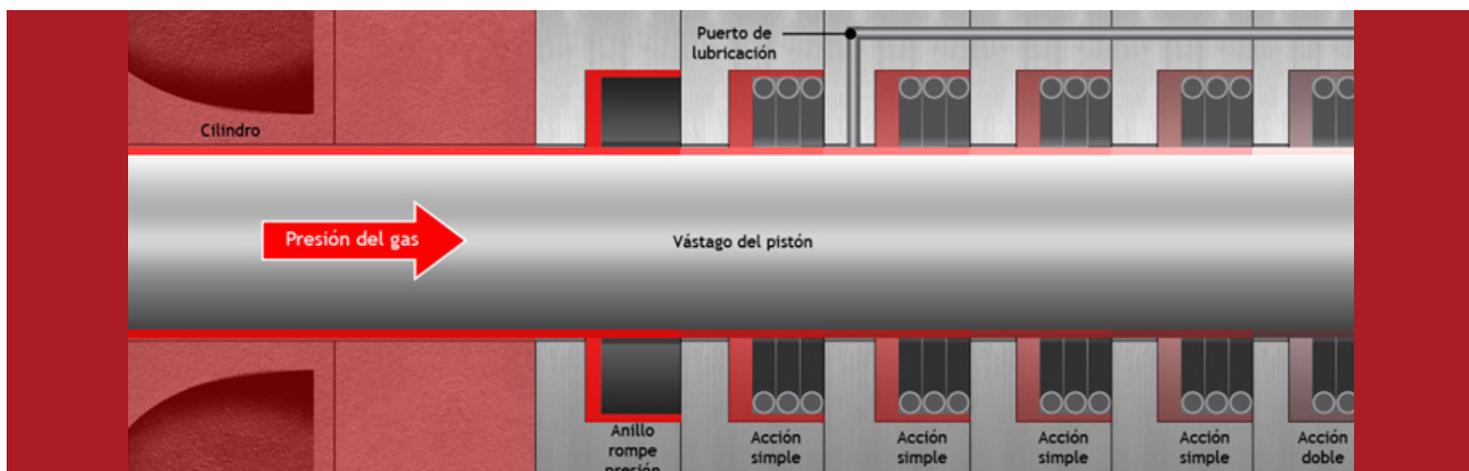


Figura 3. Componentes de la Caja de Empaquetadura.
Fuente: Curso básico de compresores Ariel.

La caja de empaquetadura se instala entre el cilindro y la pieza distanciadora. Contiene varios juegos de anillos que sellan entre el vástago del pistón y la superficie de las copas de la empaquetadura para evitar el pase de gas del cilindro hacia la pieza distanciadora.

El anillo rompe-presión reduce primero la presión del gas proveniente del cilindro. La presión remanente fuerza el flujo de gas hacia la copa

2 de la empaquetadura y las fuerzas generadas por este activan los anillos y el sello que estos deben realizar alrededor del vástago de pistón y contra la superficie de la copa siguiente para disminuir aún más la presión de Gas. Cada copa de la empaquetadura y juego de anillos a continuación reduce el flujo de gas que sale de la caja de empaquetadura hacia la línea de venteo / drenaje de esta.

“La caja de empaquetadura no sella totalmente el flujo de gas, sino que reduce considerablemente el flujo y la presión de este. En normal que se genere un mínimo venteo de gas (<2 scfm para compresores Ariel) a baja presión”.

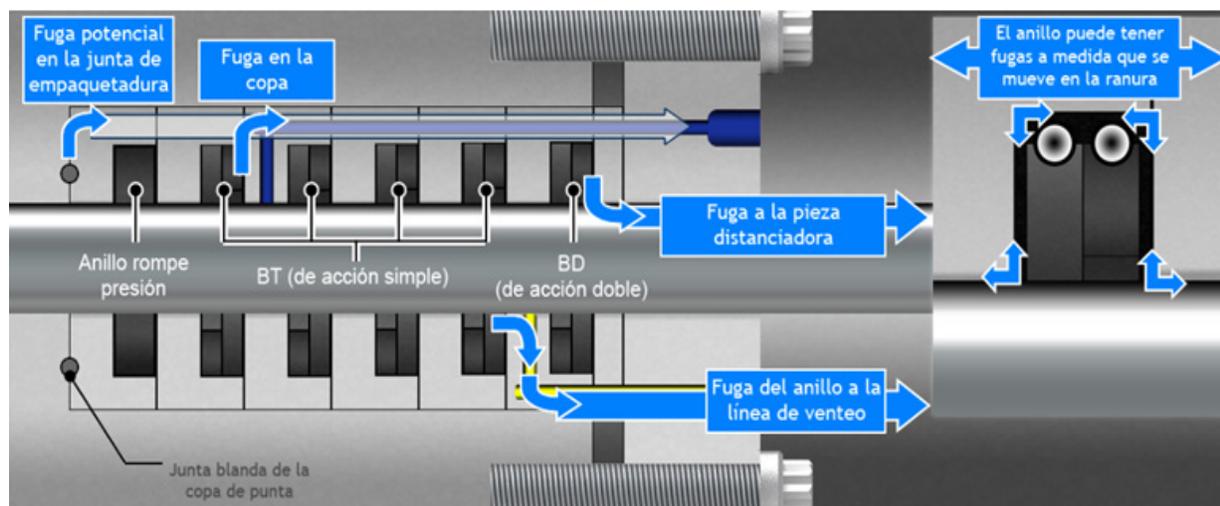


Figura 4. Tipos de Fuga de Caja de Empaquetadura.
Fuente: Curso básico de compresores Ariel.

Existen varios tipos de fugas provenientes de la caja de empaquetadura, estas se distinguen de acuerdo con el elemento origen donde se da la condición y el direccionamiento del gas, como se aprecia en la Figura 4; además del efecto que este causa como mecanismo de falla. A continuación, mencionamos los tipos de fuga:

1. Fuga por la junta de la caja de empaquetadura: El gas que fuga se desplaza a través de las copas y sale hacia la sección del distanciador donde se ubica la brida de la caja de la empaquetadura; Presurizando esa sección del distanciador y generando mayor volumen de venteo por el “cuello de cisne” o venteo superior.

2. Fuga entre copa / copa de la caja de empaquetadura: Se manifiesta de la misma manera expuesta en el tipo de fuga 1.

3. Fuga por anillos de la caja de empaquetadura: El gas que fuga se desplaza hacia la línea de venteo inferior de la empaquetadura, conectada en la cara frontal de la brida, el cual sale por la parte inferior del distanciador; ocasionando incremento de la temperatura de la línea de venteo, por el incremento del flujo de gas por esta sección.

Los tipos de fuga 1 y 2 son fácilmente detectables debido a que estas se

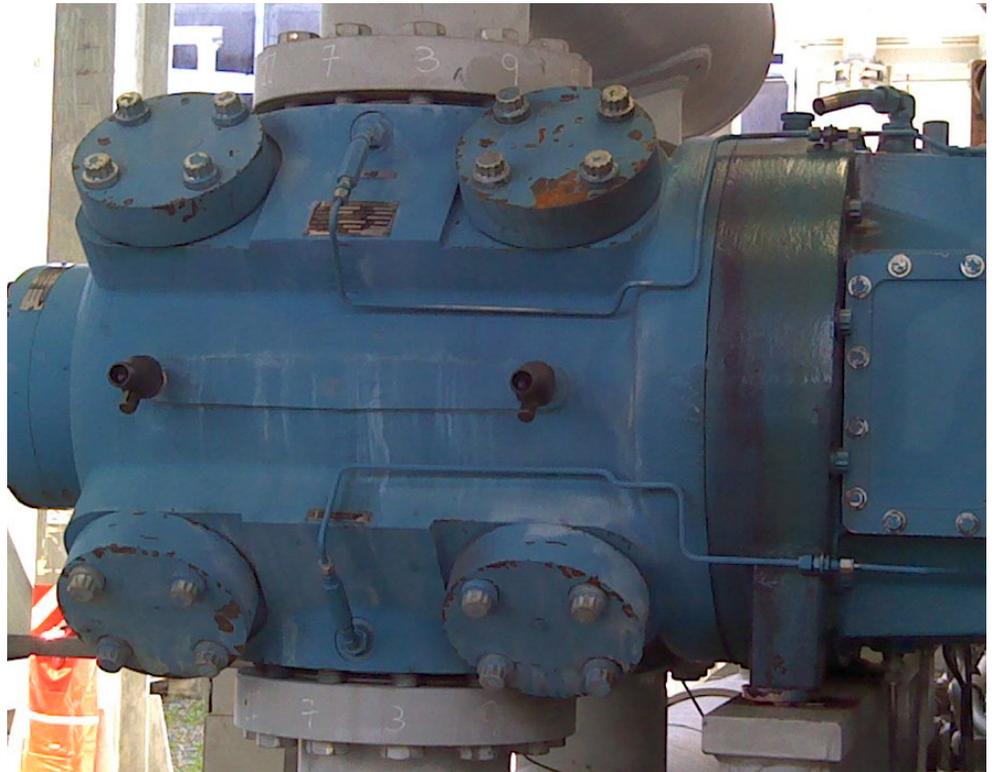


Figura 5. Venteo superior de la Caja de Empaquetadura. Fuente: El autor.

manifiestan mediante el incremento considerable del caudal de gas que se desaloja de la pieza distanciadora a través del venteo superior (Figura 5), en ocasiones dispuesto a la atmósfera y en otras canalizado a través de un sistema cerrado que va a la tube-

ría de venteo de la unidad. En el tipo de fuga 3 es un poco más compleja de detectar la anomalía o mecanismo de falla que genera la condición de fuga; es aquí donde la técnica de termografía infrarroja tiene su utilidad y aplicabilidad.



Figura 6. Zona de registro del termograma. Fuente: El autor.

Criterios para el diagnóstico de fuga en la caja de empaquetadura en cilindro de compresor recíprocante

A continuación, se presentan los criterios para el diagnóstico de fuga de caja de empaquetadura en cilindros compresores mediante el uso de la termografía infrarroja.

1. Registro del termograma: El registro del termograma debe realizarse enfocando el venteo inferior de la empaquetadura, ubicado en la parte inferior de la pieza distanciadora; además dentro del termograma también se debe apreciar la boquilla de descarga del cilindro, con el fin de apreciar tanto la temperatura del tubing de venteo inferior como la temperatura de descarga del cilindro.

2. Fundamento para el diagnóstico: El fundamento para el diagnóstico se basa en la temperatura de funcionamiento del venteo inferior de la caja de empaquetadura; y esta se compara con la temperatura de descarga del cilindro.

En condiciones normales de funcionamiento la temperatura de venteo de la empaquetadura es menor que la temperatura de descarga del cilindro al cual pertenece la empaquetadura ($T_{ve} < T_{dc}$), como se puede apreciar en la Figura 7. Cuando existe una condición de fuga (Tipo 3), el gas que fuga desde los anillos de la empaquetadura genera incremento de la temperatura del venteo inferior de esta, haciéndose mayor que la temperatura de descarga del cilindro ($T_{vp} > T_{dc}$) como se puede apreciar en la Figura 8; esto es un indicio de que existe una condición del tipo de fuga ya descrito.

T_{ve}: Temperatura de Venteo Empaquetadura.



Figura 7. Temperatura de Funcionamiento Normal del venteo de la caja de empaquetadura. Fuente: El autor.



Figura 8. Alta temperatura de venteo de la caja de empaquetadura – Fuga crítica. Fuente: El autor.

3. Criticidad de la condición: La condición se hace más crítica en la medida que se incrementa la temperatura de venteo inferior de la empaquetadura y se hace cada vez mayor que la temperatura de la boquilla de descarga del cilindro; siendo considerada una condición de alerta un delta de 20 °F y una condición de parada un delta de 30 °F, como se aprecia en la Figura 8; esto establecido para compresores Ariel ER-56-07, sin embargo, esta referencia ha sido aplicada de manera satisfactoria en compresores de otras marcas.

4. Efectividad del Diagnóstico: Con base en los criterios para la aplicación de la técnica y a los datos evidenciados en el termograma de la Figura 8; se realiza la recomendación de reemplazo de caja de empaquetadura (considerada en estado crítico) y la verificación de estado de componentes internos de la caja de empaquetadura desmontada. En la Figura 9 se evidencia la afectación de la integridad en anillos de una de las copas de la caja de empaquetadura; con ello se corrobora la efectividad del diagnóstico y la validez de los criterios para la implementación de la técnica.



Figura 9. Condición de anillos - Caja de empaquetadura. Fuente: El autor.

Conclusiones y recomendaciones

- La aplicación de los criterios para el diagnóstico de fuga en caja de empaquetadura en cilindros de compresores recíprocos, mediante la aplicación de la termografía, es un método efectivo para la detección de este tipo de fallas.
- La aplicación de la técnica permite realizar un diagnóstico oportuno, sin afectar la continuidad operacional del equipo, es decir, no se requiere sacar de servicio, ni realizar una inspección intrusiva para diagnosticar este tipo de fallas.
- En condiciones de funcionamiento normal, la temperatura de venteo de la empaquetadura del cilindro debe ser menor a la temperatura de descarga del cilindro.
- La fuga de gas por la empaquetadura afecta la eficiencia volumétrica del cilindro y puede llegar a afectar la viscosidad del aceite al ingresar el gas al carter del compresor y entrar en contacto con el aceite.
- Mediante una rutina de monitoreo por termografía el operador puede realizar un diagnóstico temprano de una condición fuga en la caja de empaquetadura de los cilindros en un compresor recíproco.
- La fuga de gas por la empaquetadura afecta la eficiencia volumétrica del cilindro y puede llegar a afectar la viscosidad del aceite al ingresar el gas al carter del compresor y entrar en contacto con el aceite.
- Mediante una rutina de monitoreo por termografía el operador puede realizar un diagnóstico temprano de una condición fuga en la caja de empaquetadura de los cilindros en un compresor recíproco.

SDT Training es nuestra plataforma online de entrenamiento en confiabilidad dedicada a enseñar y a empoderar a los ingenieros de confiabilidad a través de nuestros cursos, webinaris gratis, artículos, y comentarios en blogs.

Esenciales de Ultrasonido™ 1 es un curso de 25 módulos llenos de información y recomendaciones útiles para cualquier nivel de técnico de monitoreo de condición; pero particularmente útil para aquellos comenzando su jornada en la confiabilidad

Quien Deben Tomar Esenciales de Ultrasonido™

- * Gerentes de Planta
- * Supervisores de Turno
- * Inspectores de Ultrasonido
- * Planeadores de Mantenimiento
- * Lideres de Confiabilidad
- * Técnicos de Monitoreo de Condición
- * Técnicos
- * Mecánicos
- * Electricistas
- * Operadores



Haga clic abajo en el link para registrarse y aprender mas. Utilice el codigo **Predictiva21** para el 50% de descuento en **Esenciales Ultrasonido™ 1!**



Ultrasound
Solutions

escuchar mas



Publica tu artículo

Consulta las pautas

<https://predictiva21.com/articulista/>

Artículo Técnico



2.1 Definición de las Fallas Funcionales y Base de Conocimiento

La primera tarea a realizar será el diseño de la base de conocimiento que permitirá definir el conjunto de reglas, necesarias para realizar las estrategias u operaciones de mantenimiento según el análisis RCM (realizado conjuntamente con los expertos de operación, mantenimiento e Ingeniería). En la Figura, se especifica las relaciones y dependencia que existen entre los diferentes elementos considerados por el RCM, tales como estados funcionales, fallas funcionales, equipos, modos de falla, entre otros.

2.2 Variable Difusas y Conjuntos Difusos

En esta sección, se define el conjunto de variables difusas que son usadas en las reglas de control.

Es necesario mencionar que para la definición de las variables difusas se tomó en cuenta las variables de interés analizadas por los operadores y mantenedores las cuales permiten describir el estado del sistema y/o equipo de gas de proceso, cada variable difusa está relacionada con una magnitud específica localizada en planta específicamente con un instrumento de medición en específico, creando las tablas que vinculan cada una de las variables lingüísticas con los instrumentos del sistema y/o equipo, con esta tabla es posible ubicar físicamente cada variable lingüística con ayuda de la identificación (TAG) de los instrumentos asociados. Así entonces se pueden tomar variables como:

1. Temperatura.
2. Presión.
3. Humedad.
4. Vibraciones Radial y Axial.

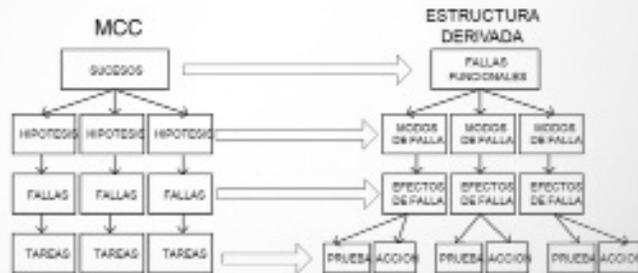


Fig. 9 Adaptación (RCM - BASE DE CONOCIMIENTO)

2.3 Reglas de Control

En esta sección se hace mención al grupo de reglas de control, que arrojarán de acuerdo a sus pesos la información a interpretar y así proceder a la obtención de las tareas de mantenimiento idóneas.

Debe mencionarse que la reducción de las reglas está orientada a la detección de estados anómalos (Anormalidades) en los sistemas y/o equipos de acuerdo a los valores lingüísticos que surgen tomando las variables difusas, de este modo la estructura general que siguen las reglas es la siguiente:

Si <Prop.1> Opl.eg ... <Prop.N> entonces <Prop. Resultante>

Las reglas de control cumplen con la finalidad de tomar las variables lingüísticas de entrada y de acuerdo a su valor lingüístico, direccionar el suceso a la variable lingüística de salida.