

## **Transformando el monitoreo en decisiones estratégicas: Metodología para la cuantificación y monitoreo de un índice de desempeño de activos en la industria Oil & Gas**

Juan Camilo Urango Pérez  
Carrera 35A #19-61  
E-mail: jurango@idc-confiabilidad.com  
Tuluá, Valle de Cauca – Colombia

### **Resumen**

La gestión de activos productivos, en el contexto de mercados competitivos, exige una búsqueda constante de la excelencia operacional. En este escenario, el uso de tecnologías de la Industria 4.0 y la creciente disponibilidad de datos de proceso y de monitoreo de condición de máquinas se han convertido en factores determinantes. Sin embargo, ello plantea el desafío de cómo generar valor a partir de estos datos, utilizándolos como herramientas clave para proporcionar a las organizaciones una visión integral del desempeño de sus activos. En este sentido, el marco normativo ISO 55000 enfatiza la necesidad de medir el desempeño dentro de un equilibrio entre costo, riesgo y desempeño, como habilitador para la eficacia en la toma de decisiones estratégicas.

En este contexto, el presente trabajo desarrolla y despliega una metodología de monitoreo de índices de desempeño de activos bajo el marco conceptual de salud de activos. Este índice se implementa en los activos críticos del sector de transporte de crudo en la industria Oil & Gas. La metodología integra datos operativos y de condición, potenciados mediante herramientas de analítica de datos e inteligencia de negocios. Además, sigue una estructura de cálculo de tres niveles: A nivel de equipo, de planta y del portafolio completo de activos; de manera que estos índices de desempeño sean apoyo para la gestión operativa, táctica y estratégica. Con esto, se busca contribuir al cierre de la brecha tradicional entre el monitoreo de condición de los activos y la toma de decisiones estratégicas.

### **Introducción**

En industrias con altas exigencias de disponibilidad en sus activos productivos, como es el caso de Oil & Gas, la gestión eficiente del mantenimiento y la confiabilidad juega un papel clave en la competitividad y sostenibilidad del negocio. En este contexto, el monitoreo de condición y el control de parámetros de procesos son herramientas fundamentales para impulsar la excelencia operacional. En la actualidad, las tecnologías de monitoreo de variables de condición de maquinaria, junto con los sistemas de control, están ampliamente implementadas en la industria, lo cual ha permitido una mayor madurez en la gestión operativa y táctica de los activos. A pesar de estos avances, el uso estratégico de estas tecnologías sigue sin aprovecharse plenamente; ya que la información generada por estos sistemas aún se percibe como un insumo para la detección de fallas, en lugar de una herramienta para conocer y anticipar el desempeño de los activos.

El desempeño de activos productivos se puede definir como la capacidad de estos para cumplir su función en el momento requerido y dentro de las especificaciones del proceso al que pertenecen. En este sentido, la disponibilidad y la confiabilidad son factores esenciales para garantizar un correcto desempeño; y a ello, debe sumarse la necesidad de que los activos mantengan los niveles de servicio exigidos por la operación. Esta relación resalta el potencial de los datos de condición, que permiten cuantificar el desempeño en términos de disponibilidad, y de los datos de proceso, que posibilitan evaluar el cumplimiento de los niveles

de servicio. En consecuencia, un índice de desempeño que integre ambos tipos de datos se plantea como una herramienta de alto valor en el marco de la gestión estratégica, táctica y operativa de activos productivos.

La familia de normas gestión de activos ISO 55000, reconoce el desafío de la estimación del desempeño y lo establece como un elemento clave para la toma de decisiones estratégicas dentro del balance que siempre debe buscarse entre costo, riesgo y desempeño [2]. En respuesta a esta necesidad, diversas investigaciones y metodologías se han venido desarrollando y presentando en la literatura, muchas de ellas con el objetivo de definir y cuantificar índices de salud de activos. Aunque se trata de concepto con gran relación y que incluso podrían ser utilizados intercambiabilmente por algunos autores, la salud de activos difiere de cierta manera del concepto de desempeño de activos. La literatura disponible sobre índices de salud de activos, generalmente se centra o considera factores asociados a todo el ciclo de vida del activo, como por ejemplo su antigüedad, la disponibilidad de repuestos, el costo total de propiedad y el valor de reposición de activos, entre otros [2-7]. Si bien estos enfoques proporcionan información valiosa sobre la salud de los activos, no abordan de manera específica el desempeño en su fase de operación y mantenimiento; lo que motiva metodologías que integren datos operativos y de condición.

En la revisión bibliográfica del estado del arte, no se identificaron estudios que propongan explícitamente el desarrollo de índices de desempeño de activos; sin embargo, diversos estudios han abordado el desarrollo de índices de salud de activos [3-7], los cuales sirven como referencia por su cercanía conceptual. Entre estos trabajos, se destaca el presentado por De la Fuente et al. [3], que propone un índice de salud de activos como herramienta para decisiones de mantenimiento a largo plazo; este índice considera factores como envejecimiento, desgaste,

condiciones ambientales e historial de carga para calificar la salud del activo y facilitar decisiones sobre posibles reemplazos. Por otro lado, Serra et al. [4] presenta un modelo basado en el costo del ciclo de vida en un compresor de la industria Oil & Gas; no obstante, este enfoque se no considera variables operativas. Además, se han desarrollado diversos modelos de índices de salud de activos de transformadores de potencia [5-7]; Estos enfoques suelen basarse en la *UK DNO Common Network Asset Indices Methodology* [8], que utiliza una suma ponderada de factores para evaluar la salud del activo, incluyendo datos de condición y variables ambientales.

A partir de esta revisión, se evidencia que la implementación práctica de estos enfoques depende de información financiera, registros históricos y datos no estructurados, los cuales no suelen estar disponibles en las fases de operación y mantenimiento; limitando así su aplicación práctica en entornos industriales. Además, en la literatura no se identifican metodologías que integren de manera holística los factores operativos y los datos de monitoreo de condición. Del mismo modo, se evidencian pocas aplicaciones documentadas en la industria del Oil & Gas, lo que plantea una oportunidad para el desarrollo de metodologías alineadas con las necesidades de este sector.

La creciente disponibilidad de datos de proceso y de condición impulsada por la Industria 4.0, representa una oportunidad clave para el desarrollo de un Índice de Desempeño de Activos. En este sentido, la integración de variables de condición—utilizadas tradicionalmente para evaluar la integridad (Vibraciones, temperatura, emisiones ultrasónicas, condición de aceites, etc.)—con variables operativas, asociadas al cumplimiento de la función (Presión, flujo, unidades producidas, etc.), abre las posibilidades para cuantificar el desempeño de activos.

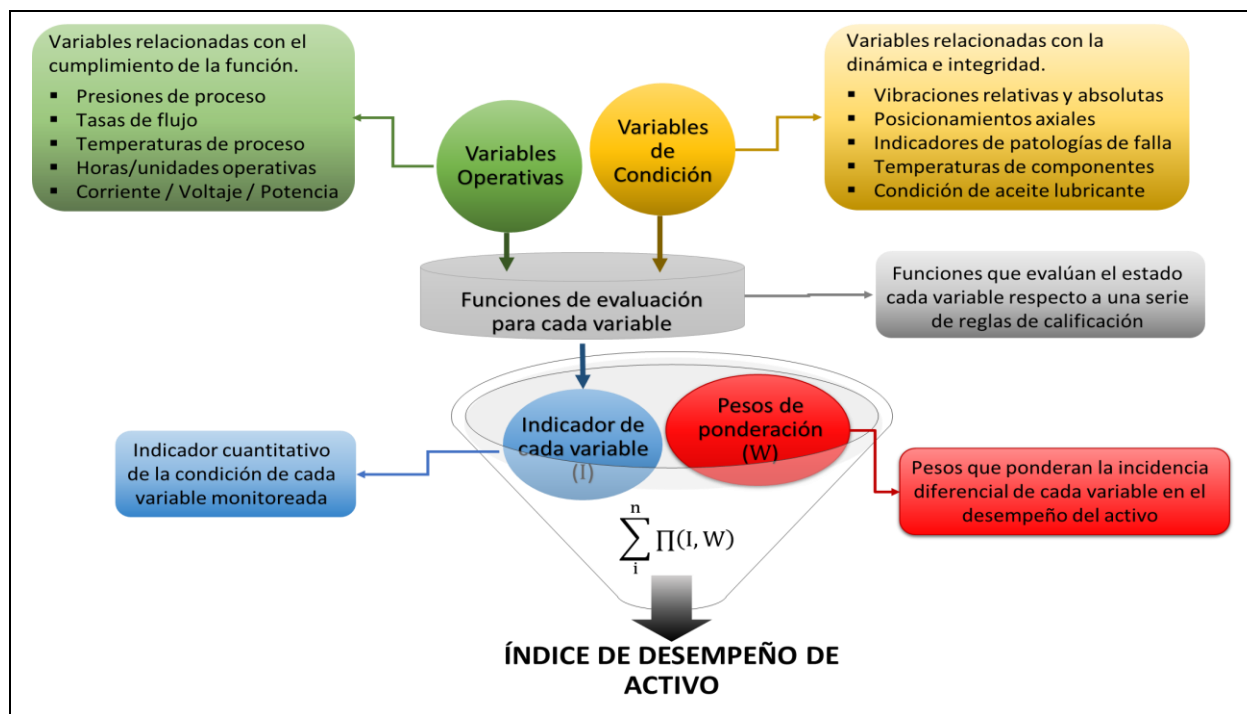


Fig. 1. Esquema metodológico para la cuantificación del índice de desempeño de activo.

Con base en lo anterior, este trabajo aborda el reto de desarrollar y desplegar una metodología para el monitoreo de un Índice de Desempeño de Activos, en el marco conceptual de salud de activos. Se inicia presentando la propuesta metodológica, que consiste de una estructura de cálculo en los tres niveles de gestión: A nivel de equipo individual (Nivel operativo), a nivel de planta (Nivel táctico) y respecto al portafolio completo de activos (Nivel estratégico). Luego se presenta el caso de aplicación en los activos principales del sector de transporte de crudo en la industria Oil & Gas. Posteriormente se presentan los resultados y, finalmente, se plantean las conclusiones y las oportunidades de desarrollo futuro.

### Metodología

La propuesta metodológica desarrollada se alinea con el marco de referencia del *UK DNO Common Network Asset Indices Methodology*; originalmente desarrollado para sistemas de transmisión y distribución, pero aquí adaptado para su aplicación en maquinaria rotativa. En este

enfoque, el Índice de Desempeño de Activos se obtiene mediante una suma ponderada de indicadores de los diferentes factores influyentes. Para esta propuesta, dichos factores surgen de las variables operativas y de condición, como se esquematiza en la figura 1.

La Figura 1 muestra el flujo metodológico de cuantificación del Índice de Desempeño de Activos. La metodología inicia con los datos de las variables operativas y de condición, que ingresan a una serie de funciones de evaluación; que se modelan con técnicas de analítica de datos y su objetivo es asignar un indicador cuantitativo a cada variable, de acuerdo con si su estado es adecuado o existen desviaciones. Por otro lado, los pesos de ponderación, que se determinan mediante un proceso de ponderación, que se detalla más adelante; y que incorporan la incidencia diferencial de cada variable en el desempeño. Finalmente, el Índice se obtiene con la sumatoria del producto de cada indicador y su peso de ponderación.

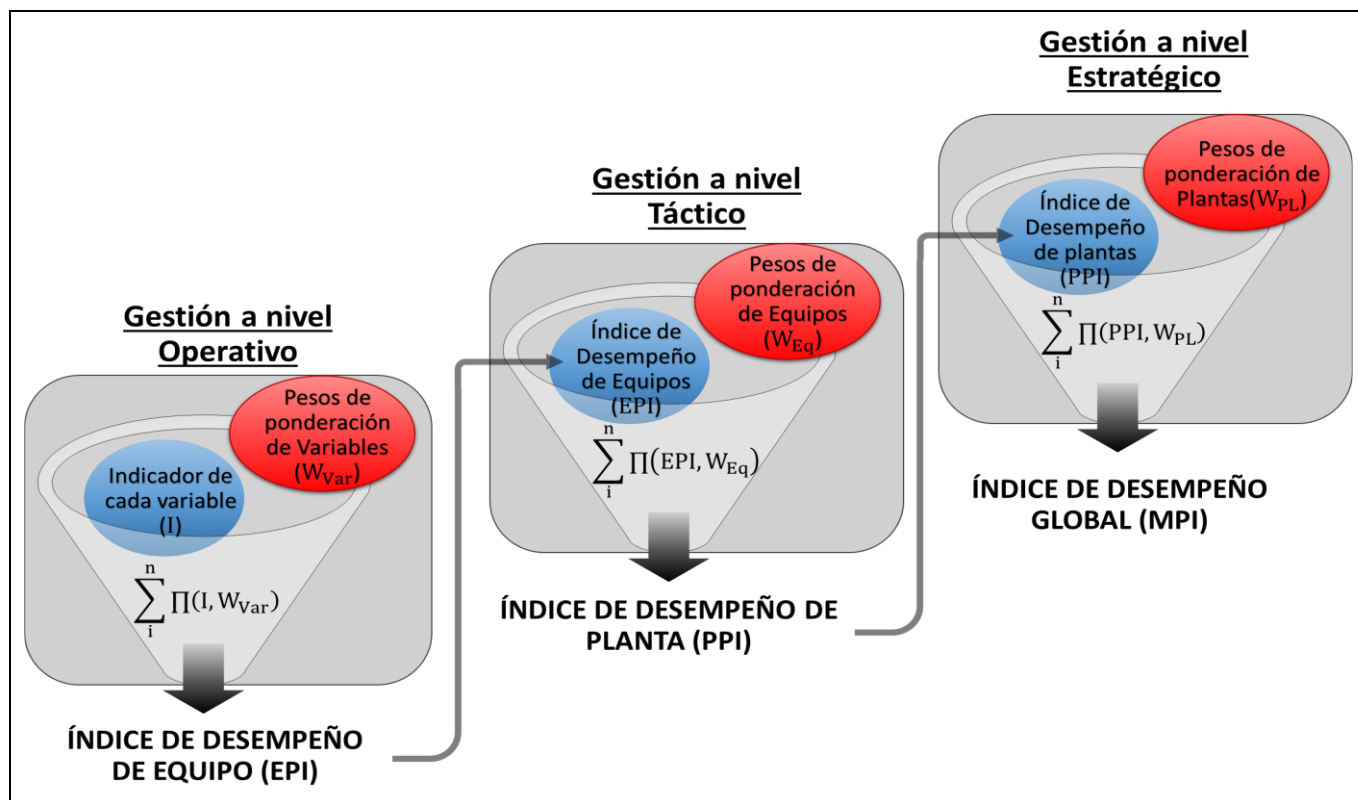


Fig. 2. Estructura multinivel de metodología de cuantificación de índices de desempeño de activos.

Una de las principales diferencias de esta metodología respecto a estudios previos es su capacidad para calcular índices de desempeño en tres niveles de gestión.: Operativo, táctico y estratégico. Con un flujo metodológico similar al descrito previamente, varios Índices de Desempeño de Activos pueden agruparse para obtener índices de niveles superiores. Así, un conjunto de índices individuales—que denominaremos Índice de Desempeño de Equipo (EPI, por sus siglas en inglés: Equipment Performance Index)—pueden combinarse para formar el índice de desempeño de la estación de trabajo, área productiva o planta industrial a la que pertenecen; dando lugar así a un Índice de Desempeño de Planta (PPI, por sus siglas en inglés: Plant Performance Index) que refleje el desempeño consolidado de una instalación industrial. Finalmente, múltiples Índices de Desempeño de Planta (PPI) pueden combinarse para formar un Índice de Desempeño Global del

Portafolio de Activos (MPI, de las siglas de Main Performance Index), que proporciona una visión estratégica del desempeño de los activos a nivel de toda la organización, como lo muestra la figura 2.

La Figura 2 representa la estructura multinivel utilizada para la cuantificación de los Índices de Desempeño. En cada nivel de gestión, el cálculo del desempeño sigue un enfoque jerárquico, en el cual un índice de menor nivel se combina con un conjunto de pesos de ponderación específicos para reflejar su impacto en el siguiente nivel. A nivel operativo, el Índice de Desempeño de Equipos (EPI) se obtiene mediante la sumatoria del producto entre los indicadores de cada variable monitoreada y sus respectivos pesos de ponderación ( $W_{Var}$ ). Posteriormente, en el nivel táctico, los Índices de Desempeño de Equipos (EPI) se combinan con sus pesos de ponderación ( $W_{Eq}$ ) para calcular el Índice de Desempeño de Planta (PPI). Finalmente, en el nivel estratégico,

los Índices de Desempeño de Planta (PPI) se ponderan con los pesos de cada planta ( $W_{PI}$ ) para obtener el Índice de Desempeño Global del Portafolio de Activos (MPI).

La formulación de los tres índices de desempeño se presenta en las ecuaciones (1-3). Y, a continuación se presenta el método de definición de los pesos de ponderación; así como la manera de definir las funciones de evaluación, que producen los indicadores para cada variable.

$$EPI = \sum_i^n \frac{W_{Var_i}}{\sum W_{Var}} \cdot I_i \cdot k \quad (1)$$

$$PPI = \sum_i^n \frac{W_{Eq_i}}{\sum W_{Eq}} \cdot EPI_i \quad (2)$$

$$MPI = \sum_i^n \frac{W_{PI_i}}{\sum W_{PI}} \cdot PPI_i \quad (3)$$

Donde:

$I_i$ : Indicador de cada variable.

$K$ : Constante para establecer la escala.

$W_{Var}$ : Peso de ponderación de cada variable.

$W_{Eq}$ : Peso de ponderación de cada equipo.

$W_{PI}$ : Peso de ponderación de cada planta.

$EPI$ : Índice de desempeño de equipo.

$PPI$ : Índice de desempeño de planta.

$MPI$ : Índice de desempeño global.

### Metodo de ponderación

La definición de los pesos de ponderación se realizó mediante una metodología de ranking, en la cual, a través de múltiples espacios de trabajo, se recopilan las consideraciones de los diferentes expertos y personal implicado en la gestión del desempeño de los activos, tanto a nivel de equipo, planta y portafolio completo de activos. El método consiste en realizar sesiones con los responsables de cada nivel de gestión, en las cuales se les solicita que evalúen la incidencia diferencial de

cada variable, equipo o planta en el desempeño global. Para ello, se les proporciona un formato estructurado donde se listan los parámetros a evaluar y se les asigna una cantidad limitada de puntos para distribuir en función de su criterio dentro de una escala determinada. En la figura 3 se presenta un recorte del formato que se llenó para las máquinas del caso de estudio de este artículo, que se detallan posteriormente.

CANTIDAD DE PUNTOS A ASIGNAR				
Cantidad de variables a calificar			16	
Número de puntos a asignar en la encuesta			53	
EVALUACIÓN VARIABLES OPERATIVAS				
ID	VARIABLE	EVALUACIÓN		
		Peso	División	Puntos restantes
1	Presión de succión	4	53	0
2	Presión descarga	5	53	
3	Presión de filtro	0	53	
4	Flujo descarga	2	53	
5	Temperatura Bomba Acople	4	53	
6	Temperatura BBA Libre Aceite in	4	53	
7	Temperatura BBA Libre Aceite out	4	53	
8	Temperatura Carcasa Bomba	3	53	
9	Temperatura Motor Acople	4	53	
10	Temperatura Motor Libre	3	53	
11	Temperatura de devanado	3	53	
12	Voltajes	3	53	
13	Corrientes	3	53	
14	Potencia real	3	53	
15	VZE - Posición axial	4	53	
16	RPM - Relacionado a sobre velocidad	4	53	

Fig 3. Formato de evaluación para la definición de pesos de ponderación.

La Figura 3 muestra un ejemplo de definición de pesos para variables operativas, donde se analizaron 16 variables. En una de las filas, se establece una limitación de 53 puntos totales a asignar, lo cual representa un elemento clave en el éxito del método de ponderación por ranking. Esta restricción fue diseñada con el objetivo de forzar a los evaluadores a priorizar las variables que realmente consideran más influyentes en el desempeño del activo, evitando una distribución homogénea de los puntos.

El criterio utilizado para la restricción de puntos se fundamenta en limitar la cantidad asignable al 66% del total posible. Esto evita que los evaluadores asignen la máxima ponderación a todas las variables, lo que haría que la ponderación pierda efectividad. A modo de ejemplo, considerese un equipo con 10 variables a evaluar y

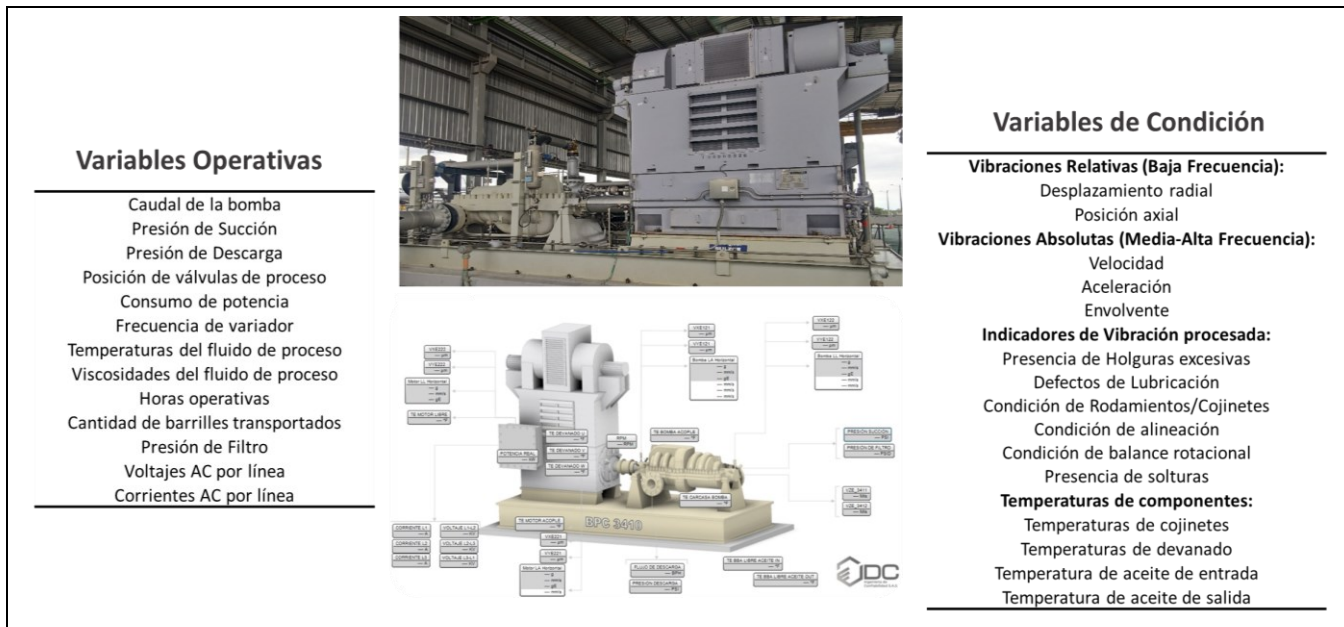


Fig. 4. Imagen representativa de los activos del caso de estudio con las variables monitoreadas.

una escala de 1 a 5, el total de puntos sin restricción sería 50; en un escenario sin limitaciones, un evaluador podría asignar 5 puntos a todas las variables por igual, lo que impediría diferenciar el impacto de cada una en el desempeño. Para evitar esto, la limitación del 66%, limitaría al evaluador a máximo 33 puntos para asignar, con lo cual se verá enfrentado a la necesidad de priorizar la asignación de puntos a las variables con mayor impacto en el desempeño del activo. En la ecuación (4) se presenta la formulación del cálculo de esta limitación ( $Max_{Puntos}$ ) de acuerdo con el número de parámetros a evaluar ( $N$ ) y el valor máxima de escala que se desee utilizar ( $Max_{Escala}$ ).

$$Max_{Puntos} = N \cdot Max_{Escala} \cdot 0,66 \quad (4)$$

#### Diseño de las funciones de evaluación

Las funciones de evaluación constituyen un elemento clave de la metodología, ya que generan los indicadores de cada variable, los cuales permiten calcular el Índice de Desempeño de Equipo (EPI) y, a partir de este, los índices de niveles superiores. Además, cabe mencionar que

representan un elemento innovador de este desarrollo, que no se ha evidenciado en otros estudios del estado del arte. Estas funciones reciben los datos de las variables del activo y genera una evaluación cuantitativa dentro de una escala definida, indicando qué tan adecuados son los valores respecto a niveles de referencia.

Dado que los niveles de las variables de condición y operativas dependen del tipo de maquinaria, proceso productivo y contexto operacional, cada activo requiere funciones de evaluación particulares. Para el desarrollo de estas funciones en el caso de estudio, se aplicaron herramientas de analítica de datos sobre un conjunto histórico de datos representativos de un desempeño adecuado. A partir de estos datos, se establecieron reglas de clasificación que permiten evaluar el estado de cada variable en distintos escenarios operativos. Debido a que una descripción detallada del proceso analítico aplicado a cada variable excedería el alcance de este trabajo, más adelante se presenta, a manera de muestra, la función de evaluación de la variable consumo energético para el caso de estudio.

**Caso de estudio**

La metodología desarrollada se implementó en una organización del sector de transporte de crudo, cuya infraestructura se basa en una red de oleoductos extendidos a lo largo del departamento del Meta, Colombia. En esta organización, los activos a nivel operativo corresponden a bombas principales de trasiego de crudo, las cuales operan en estaciones de bombeo (Nivel táctico); mientras que a nivel estratégico, la organización cuenta con tres estaciones, donde se agrupa su portafolio de activos críticos. En la Figura 4, se presenta una imagen representativa del caso de estudio, incluyendo una fotografía de una de estas bombas de trasiego, una visualización en 3D del monitoreo en línea, y el listado de variables operativas y de condición que actualmente se monitorean.

**Resultados**

Como resultado del despliegue de la propuesta metodológica en el caso de estudio, se obtuvo el cálculo y monitoreo de un conjunto de índices de desempeño en los tres niveles de gestión, proporcionando a los diferentes implicados un monitoreo integral del desempeño de sus activos. Para facilitar la visualización y monitoreo de estos índices, así como de otras variables relevantes sobre la condición del activo, se desarrolló un tablero de visualización en una herramienta de *Business Intelligence*. Esta plataforma permite una interpretación más intuitiva de los datos y facilita la toma de decisiones basada en información en tiempo real. En la Figura 5, se muestra una vista general del tablero desarrollado, mientras que en la Figura 6, se presenta el monitoreo de los tres niveles de índices de desempeño aplicados al caso de estudio.

De acuerdo con lo indicado en la sección anterior, se quiere traer a colación como parte de los resultados del despliegue de la metodología, la función de evaluación de la variable de consumo energético de una de las bombas de trasiego de crudo del caso de estudio. Para ello, en la figura 7

se presenta el gráfico de correlación del conjunto de pares de datos de consumo energético en potencia [HP] vs Velocidad de rotación [rpm], con una serie de zonas de evaluación esquematizadas con colores.



Fig. 5. Tablero de BI desarrollado para visualización y monitoreo.

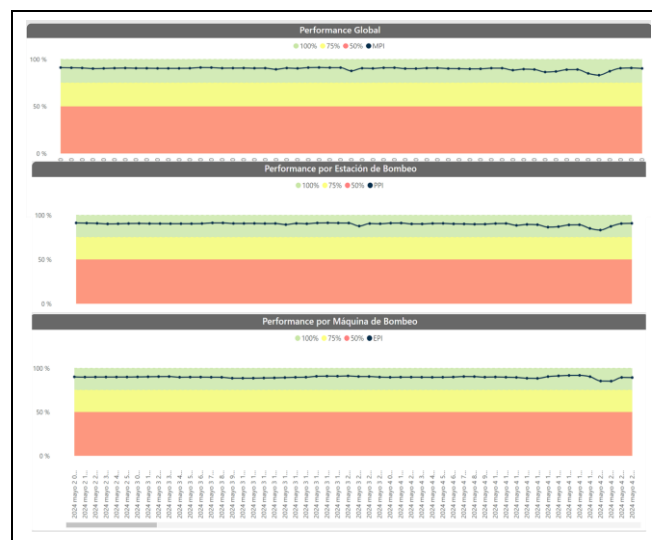


Fig. 6. Tendencia de Índices de Desempeño en los tres niveles de gestión.

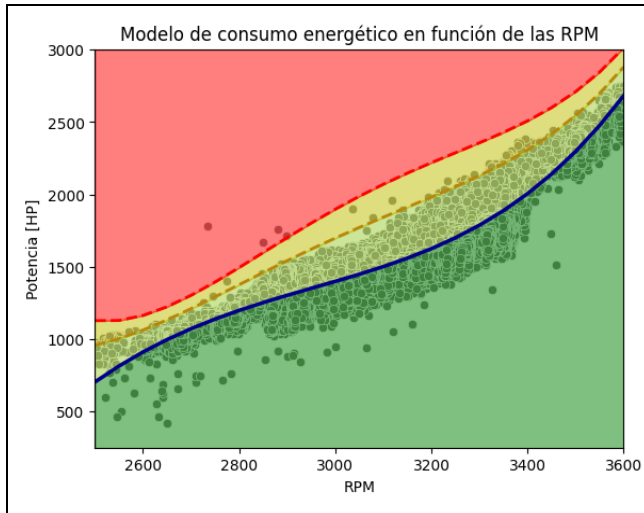


Fig. 7. Modelo esquemático de la función de evaluación de la variable consumo energético.

La gráfica de la figura 7 muestra la función de evaluación de la variables consumo energético con una escala de 1 a 5 y que consiste en las siguientes reglas: Todos los datos que se ubiquen en la zona marcada en verde tendrán una evaluación de 4 a 5, todas las que se ubiquen en las zonas amarillas tendrán una evaluación entre 2,5 y 4; y todos los datos que se ubiquen en la zona roja tendrán una evaluación por debajo de 2,5 acercándose a 1 en la media que más se alejen. Nótese que lo anterior, en términos prácticos, es una evaluación de que tanto consumo energético excesivo podría tener el activo ante los diversos escenarios de velocidad rotación a los que puede exponerse.

### **Conclusiones y Trabajos Futuros**

Los resultados del desarrollo y despliegue de la propuesta metodológica muestran cómo la cuantificación y monitoreo de los Índices de Desempeño de Activos en los diferentes niveles de gestión se consolidan como una herramienta innovadora y de alto valor para optimizar la gestión de activos críticos en las organizaciones. Además, este desarrollo evidencia cómo la integración de variables operativas y de condición a través de una estructura multinivel—desde el

nivel operativo (EPI) hasta el nivel estratégico (MPI)—proporciona una visión holística del desempeño de los activos, como apoyo para una toma de decisiones en donde se eviten sesgos desde cualquiera de las dos visiones tradicionalmente separadas de la gestión de maquinaria, mantenimiento y operación. Otro aspecto relevante es la implementación de herramientas de analítica de datos y Business Intelligence para la transformación de grandes volúmenes de datos en información valiosa, apuntando a la toma de decisiones basada en datos.

Desde la perspectiva estratégica, esta metodología, diseñada para los tres niveles de gestión y alineada con los principios de la ISO 55000, permite cerrar la brecha entre la evaluación del desempeño de los activos y la toma de decisiones estratégicas. Su escalabilidad es otro elemento clave, toda vez que abre oportunidades de implementación en otros sectores industriales. En conclusión, el enfoque propuesto representa un paso significativo en la transición hacia una gestión de activos basada en datos, alineándose con las tendencias emergentes de la Industria 4.0.

Como parte de los trabajos futuros para la mejora y expansión de esta metodología, se identifican las siguientes líneas de desarrollo:

- Ampliar la validación de la metodología en una mayor variedad de activos, con el fin de identificar oportunidades de estandarización.
- Fortalecer los desarrollos de analítica de datos utilizados en la construcción de las funciones de evaluación, cuyo desarrollo detallado se plantea documentar en futuras publicaciones.
- Explorar la implementación de técnicas de pronóstico en los diferentes niveles de los indicadores de desempeño.
- Incorporar los principios de análisis de sistemas en paralelo y en serie para mejorar la evaluación de los índices de desempeño en los niveles táctico y estratégico de la metodología.



## Referencias

[1] ACIEM, “Guía para elaboración y presentación de trabajos”, Instructivo para presentar trabajos en congresos promovidos por ACIEM. Bogotá. 2024.

[2] J. M. González, “Análisis del impacto del Índice de Salud de Activos en las Estrategias del Mantenimiento”. Revista PMM Project mayo-junio 2021. 24 de noviembre de 2021.

[3] A. De la Fuente, A. Crespo, A. Sola y J. Serra. “Determinación de un Índice de Salud de Activos, para la ayuda de toma de decisiones a largo plazo en la gestión del mantenimiento”, Revista digital de la Asociación Española de Mantenimiento (AEM), 11 de octubre de 2022.

[4] J. Serra, A. De la fuente, A. Crespo, A. Sola, A. Guillén, E. Candón y P. Martínez-Galan. “A model for lifecycle cost calculation based on Asset health index”, International Conference On Smart Infrastructure And Construction 2019, pp. 91-98 ene. 2019, Doi: 10.1680/icsic.64669.091.

[5] A.Y. Ramírez, “Evaluación de la salud de activos de los transformadores de potencia de las subestaciones del área metropolitana del Valle de Aburrá”. Medellín, 2018.

[6] R. Hashim, F. Usman, y I. N. Z. Baharuddin, “Determining Health Index of Transmission Line Asset using Condition-Based Method”, Resources, vol. 8, n.o 2, p. 80, abr. 2019, Doi: 10.3390/resources8020080.

[7] D. A. Zaldivar y A. A. Romero, “Health Index for Power Transformer Condition Assessment: A Comparison of Three Different Techniques”, Journal of Applied Research and Technology, vol. 20, n.o 5, pp. 536-545, oct. 2022, Doi: 10.22201/icat.24486736e.2022.20.5.1606.

[8] UK DNO Common Network Asset Indices Methodology: Health and Criticality. Version 1.1. Abril 2021.

Ing. MEng (C). Juan Camilo Urango Pérez

Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, cursando maestría en Ingeniería Mecánica de la Facultad de Minas de esta misma universidad, profesional certificado como Gestor de Mantenimiento y Confiabilidad de la Asociación Colombiana de Ingenieros ACIEM, analista de vibraciones certificado en la categoría III según ISO 18436-2, con amplia formación en mantenimiento industrial, confiabilidad y gestión de activos. Líder en implementación de estrategias de monitoreo de condición integrando elementos de la industria 4.0 y análisis rotodinámicos en turbomaquinaria en Colombia y diversos países de Centroamérica. Actualmente desempeñándose con líder de Ingeniería e Innovación de la compañía IDC Ingeniería de Confiabilidad SAS, donde está al frente de los servicios y proyectos de Ingeniería de Confiabilidad, Monitoreo de Condición, análisis de Turbomaquinaria y Analítica aplicada a la confiabilidad y el mantenimiento.

### **Datos de autor**

Juan Camilo Urango Pérez

Teléfono:

Oficina: 602 2316359

Celular: +57 3204998749

Dirección:

Residencia: Calle 28A #42-15.

Oficina: Carrera 35A #19-61

E-mail: [jurango@idc-confiabilidad.com](mailto:jurango@idc-confiabilidad.com)

Ciudad: Tuluá, Valle del Cauca

País: Colombia.