

AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE ACTIVOS EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS: APLICACIÓN EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITUANGO

YSTER SANTIAGO HERRERA HERRERA, DANIEL JOSE GAVIRIA DIEZ

Carrera 58 # 42 - 125

E.mail: yster.herrera@epm.com.co, dgaviriad@unal.edu.co

Medellín – Colombia

Resumen

El análisis de criticidad es una metodología clave en empresas de generación de energía para medir los riesgos asociados a sus activos. Sin embargo, cuando se realiza manualmente, este proceso puede volverse lento y costoso. Aprovechando la madurez en la gestión de la información, el uso de datos de fallas, información técnica en el sistema de gestión de activos y herramientas de analítica de datos, se desarrolló un modelo automatizado de evaluación de criticidad.

Este modelo permite mantener la criticidad actualizada en tiempo real, incorporando los eventos de fallas que ocurren a diario. Esto no solo agiliza la toma de decisiones efectivas, sino que también reduce en un 30% los tiempos de ejecución de la metodología, asegurando que cada nuevo activo que entra en operación tenga su valor de criticidad desde el inicio. De esta manera, se elimina la incertidumbre sobre el nivel de riesgo de los activos.

El modelo fue probado exitosamente en la entrada en operación de los activos de las primeras cuatro unidades de generación de la central hidroeléctrica Ituango. Los resultados fueron significativos en términos de ahorro de tiempo y costo, y proporcionaron una identificación precisa de riesgos basada en datos. Además, el modelo reveló hallazgos sobre la calidad de la información y generó recomendaciones para mitigar los riesgos identificados, sentando las bases para la implementación de metodologías para la planeación del mantenimiento como RCM y RBI.

Introducción

La identificación, evaluación y gestión de los riesgos asociados a los activos son principios fundamentales en la gestión de activos. En las centrales hidroeléctricas, caracterizadas por su alta densidad de activos, resulta crucial priorizar actividades como mantenimiento, modernización, repotenciación y reposición. Estas decisiones requieren una comprensión clara de las consecuencias de las fallas de los activos y la probabilidad de que estas ocurran.

Jerarquizar y clasificar los activos físicos productivos de acuerdo con su importancia en la organización, teniendo en cuenta la probabilidad de que ocurra un evento y la consecuencia que se generaría hacia personas, ambiente, calidad, reputación y finanzas. Matemáticamente, la criticidad se puede expresar por la ecuación 1.

$$\text{CRITICIDAD} = \text{CONSECUENCIA} \times \text{PROBABILIDAD} \quad (1)$$

Para lograr clasificar los activos y asignarle un nivel de importancia, es requerido definir unas escalas de calificación para las variables, es allí cuando definimos la matriz de criticidad. Ver fig 1:

PROBABILIDAD	CONSECUENCIA				
	Mínima	Menor	Moderada	Mayor	Máxima
	1	2	4	8	16
Muy alta	5	10	20	40	80
Alta	4	8	16	32	64
Media	3	6	12	24	48
Baja	2	4	8	16	32
Muy baja	1	2	4	8	16

■ Muy alta
 ■ Alta
 ■ Media
 ■ Baja

Fig 1. Matriz de criticidad.

Realizar este proceso manual de análisis de criticidad es lento y costoso. Se estima que un equipo dedicado puede analizar aproximadamente 10 activos por hora [1], lo que implica semanas completas de trabajo para centrales que son intensas en activos. Además, los costos asociados al personal involucrado pueden alcanzar hasta \$14.360 por activo, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Costo promedio de un análisis de criticidad en el negocio de generación [2].

Activos centralizados	
Instalación	\$ 8.175.875
Activo	\$ 14.360

La norma ISO 55001, en su ítem 6.1, establece que las organizaciones deben planificar acciones para abordar riesgos y oportunidades, considerando cómo estos evolucionan en el tiempo [3]. Por tanto, disponer de datos de criticidad actualizados y precisos es esencial para la gestión efectiva de los activos. Sin embargo, realizar este proceso manualmente dificulta cumplir con los requerimientos de actualización constante establecidos por la norma.

Para abordar estas limitaciones, se propone un modelo automatizado para el análisis de criticidad de activos en centrales hidroeléctricas. Este modelo facilita la evaluación eficiente y automática de la criticidad, mejorando la toma de decisiones estratégicas en mantenimiento y gestión de activos. Al proporcionar una base sólida para la identificación y priorización de acciones correctivas y preventivas, este modelo contribuye a la mejora continua de los procesos y a la optimización del rendimiento de los activos en las centrales de generación hidráulica.

Metodología

En cualquier central de generación, es fundamental garantizar la continuidad operativa, ejecutar los planes de mantenimiento con criterio y gestionar los riesgos de manera efectiva. Para

lograrlo, es indispensable contar con una taxonomía bien estructurada y previamente definida. Una vez establecida, la aplicación de una metodología de análisis de criticidad proporciona los criterios necesarios para la toma de decisiones informadas.

A continuación, se presenta un modelo diseñado con el objetivo de automatizar y estandarizar el análisis de criticidad de activos en centrales de generación, basado en un nivel 6 de taxonomía. Este modelo se fundamenta en el análisis de atributos específicos y en datos documentados en fuentes bibliográficas reconocidas.

Función, tipo de operación, modo de falla, tipo de falla y efecto: Para realizar el cálculo de criticidad, es fundamental disponer de una serie de atributos específicos. Por este motivo, en este apartado se proponen los procedimientos necesarios para su obtención.

Los modelos de criticidad requieren un contexto previo, lo que implica incluir elementos clave como la función del activo, el modo de falla crítico y los efectos asociados a dicho evento. En el modelo propuesto, estos atributos pueden definirse de diversas maneras, tal como se ilustra en la Tabla 2.

Tabla 2. Definición de función, modo de falla y efecto.

Nivel de prioridad	Nombre	Descripción
1	Manual	Descrito por el equipo al momento de realizar el análisis
2	Criticidad	Registro en el último análisis de criticidad
3	Especificaciones	Consideración general con base a especificaciones presentes en EAM Maximo
4	Valor predeterminado	Consideración general con base a la literatura y análisis de criticidad antiguos

La tabla anterior establece el orden en que debe recopilarse el dato relacionado con la función, dependiendo de su disponibilidad. Este dato es alimentado por una base de datos que debe ser previamente construida, donde se integren las definiciones obtenidas en análisis de criticidad realizados en la central. Para activos que no cuentan con análisis previos o que se incorporan recientemente al portafolio, se dispone de una base de datos con valores predeterminados de función. Estas definiciones pueden ser ajustadas y detalladas automáticamente mediante las especificaciones registradas en el EAM Maximo, como se observa en el ejemplo de la Figura 2.

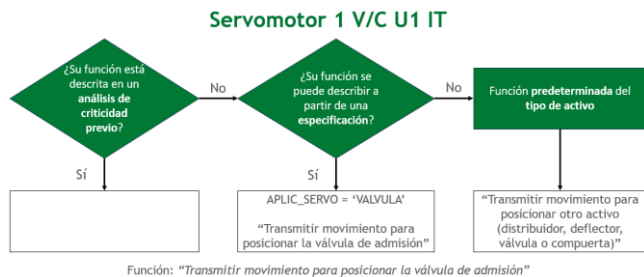


Fig 2. Ejemplo de definición de función de activo.

El tipo de operación, modo de falla crítica, tipo de falla y efecto se determinan de manera similar a la función. Estos atributos son extraídos automáticamente por el modelo desde archivos de importación previamente creados y documentados.

Un aspecto clave a considerar es la disponibilidad de repuestos ante escenarios de fallas críticas, ya que este factor impacta directamente los tiempos de indisponibilidad. Para ello, se utiliza la ubicación denominada ‘ROTABLES’ en el EAM Maximo, donde se encuentran activos como rodetes o transformadores de potencia. En la siguiente tabla se presenta la manera de asignar esta información en el modelo, dependiendo de la disponibilidad de datos existentes.

Tabla 3. Definición de disponibilidad de repuestos.

Nivel de prioridad	Nombre	Descripción
1	Especificaciones	Consideración general con base a conteo de activos rotables del mismo tipo en la misma central
2	Valor predeterminado	Consideración general con base a las tendencias observadas en las centrales de generación

Las características anteriores son necesarias para primero dar un contexto previo para determinar qué tan crítico es el activo que se este analizando, además de la identificación inicial del modo de falla, stock de repuesto y redundancia que son esenciales para determinar la probabilidad y consecuencia.

Probabilidad de falla: Para determinar la probabilidad del evento de falla se hará uso del concepto del tiempo medio entre fallas (MTBF), usando el tiempo registrado en las ordenes de trabajo asociadas al modo de falla crítica, el cual depende exclusivamente del tipo de activo y se mapea con los problemas presentes en los códigos de anomalía del EAM.

Luego de obtener todas las OT asociadas al modo de falla crítica se define “n” como el número total de órdenes de trabajo. Además, se define un tiempo total de vida del activo como la diferencia entre la fecha actual y su fecha de instalación. Por último, se define el tiempo medio entre fallas como la razón entre el tiempo de vida del activo y la cantidad de órdenes de trabajo asociadas a su modo de falla crítica:

$$MTBF_{OT} = \frac{T_{activo}}{n} \quad (2)$$

Como se muestra en la Tabla 5, es fundamental identificar y extraer las fechas relevantes de las órdenes de trabajo. En caso de contar con un sistema de información como un EAM, este se

convierte en la fuente principal para obtener dicha información.

Sin embargo, es importante reconocer que, en muchos casos, las órdenes de trabajo no siempre son diligenciadas de manera completa o eficiente. Por esta razón, es necesario contemplar el uso de fuentes de información alternativas, tal como también se detalla en la Tabla 5. Estas fuentes permiten complementar y validar los datos necesarios para garantizar la precisión del análisis, especialmente en escenarios donde la calidad de los registros es limitada.

Tabla 5. Definición de MTBF y MTTR.

Nivel de prioridad	Nombre	Descripción
1	Órdenes de trabajo (Activo)	Cálculo realizado a partir de las órdenes de trabajo del activo registradas en el EAM
2	Criticidad (Activo)	Registro en el último análisis de criticidad
3	Generación (Activo)	Duración según históricos de operación, mantenimiento o planeación del negocio de generación
4	Órdenes de trabajo (Tipo de activo)	Cálculo realizado a partir de las órdenes de trabajo del tipo de activo registradas en el EAM
5	Valor predeterminado (Tipo de activo)	Consideración general con base a la literatura y análisis de criticidad antiguos

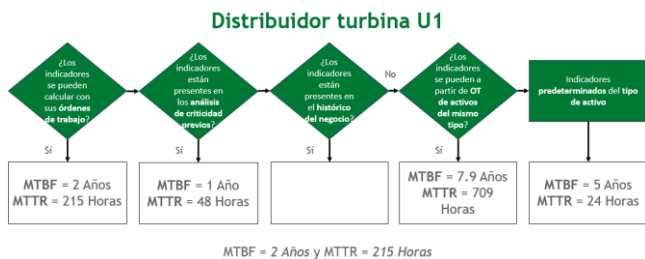


Fig 3. Ejemplo de determinación de MTBF y MTTR de un activo.

La determinación del MTBF es necesaria para establecer la probabilidad de falla usando una distribución exponencial como se observa en la ecuación 3.

$$P_f = 1 - \exp\left(-\frac{1}{MTBF}\right) \quad (3)$$

Posteriormente, se compara este resultado con la Tabla 6 para determinar el nivel:

Tabla 6. Nivel de probabilidad.

Nivel de probabilidad	Probabilidad [%]
Muy alta	>85
Alta	85
Media	60
Baja	25
Muy baja	<5

Consecuencia personas: Medir el impacto de un activo en una central de generación no es una tarea sencilla, ya que cada tipo de activo posee características únicas que pueden generar diferentes niveles de afectación, especialmente en relación con las personas. Sin embargo, el nivel de afectación de cada activo será determinado siguiendo la tabla 7. Este enfoque garantiza una evaluación más estructurada y objetiva del impacto de cada activo, teniendo en cuenta sus particularidades y su influencia en el sistema general.

Tabla 7. Definición de Impacto Personas e Impacto Ambiental.

Nivel de prioridad	Nombre	Descripción
1	Características técnicas	Cálculo realizado a partir de especificaciones registradas en el EAM o en archivos de importación
2	Criticidad	Registro en el último análisis de criticidad

3	Valor predeterminado	Consideración general con base a la literatura y análisis de criticidad antiguos
---	----------------------	--

La primera opción, por su parte, implica la creación de un modelo de cálculo basado en las características técnicas del activo. Un ejemplo de esto es que el nivel de impacto de los transformadores de corriente dependerá de su nivel de corriente, el cual puede variar. Este modelo de cálculo será específico para cada clasificación de activo y se incluirá en su sección correspondiente. Para profundizar en este enfoque, se puede consultar la referencia citada como 1. La segunda opción se refiere al dato registrado en el análisis de criticidad más reciente, que se utilizará si no se dispone de información actualizada. Finalmente, La tercera opción se aplica cuando el tipo de activo tiene un nivel de impacto predefinido, independientemente de sus características específicas; por ejemplo, el nivel de impacto de los Rodetes Francis siempre se considera mínimo.

Consecuencia ambiental: e manera similar a la evaluación del impacto en las personas, no siempre es sencillo asignar una consecuencia ambiental a todos los activos. Sin embargo, la determinación de la consecuencia dependerá de la disponibilidad de información y del tipo de activo que se evalúe, siguiendo la prioridad descrita en la tabla 7.

La tercera opción se utiliza cuando está claro que el tipo de activo tiene un nivel de afectación determinado, independientemente de sus características. Por ejemplo, el nivel de impacto de las presas es siempre 16: Máximo. La primera opción, en cambio, consiste en elaborar un modelo de cálculo basado en las características técnicas del activo. Por ejemplo, el nivel de impacto de las cavernas dependerá de su tipo de aplicación, que puede variar. Este modelo de cálculo será diferente para cada clasificación de activo [1]. De manera similar, la segunda opción se refiere al dato registrado en el análisis de criticidad más reciente.

Consecuencia calidad: El impacto que puede generar un activo de una central de generación en la calidad del servicio está directamente relacionado con la estrategia organizacional y el cumplimiento de la meta de disponibilidad de la central. En otras palabras, se mide el tiempo crítico, que corresponde al periodo en el que una falla en el activo provoca la indisponibilidad de la central de generación, permitiendo calcular el porcentaje de afectación en su disponibilidad. El tiempo de indisponibilidad, generado por los fallos en los activos, se obtiene multiplicando el tiempo crítico del activo por la cantidad de unidades de generación que quedan fuera de operación en caso de falla.

En el caso de los activos que no indisponen la generación de energía, su tiempo crítico es nulo, ya que no hay una afectación a la prestación del servicio. Sin embargo, si un activo que indispone la generación de energía llegara a fallar, habría que tener en cuenta dos factores diferentes: si el activo es reparable y si hay disponibilidad de repuestos como se observa en la figura 3.

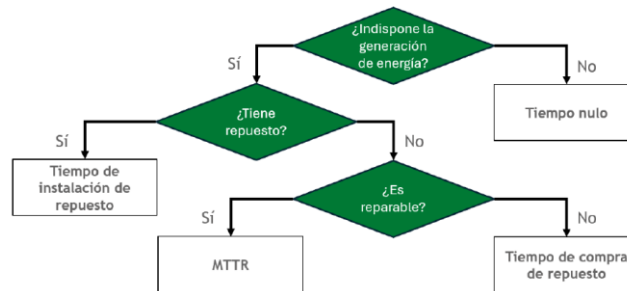


Fig 4. Definición de tiempo crítico.

En el caso de los activos que sí tienen repuesto, se toma como tiempo crítico el tiempo promedio de instalación de un activo, que en la mayoría de los casos puede ser menor a dos días. Por otro lado, si un activo no tiene repuesto y no es reparable, se ve necesario usar como tiempo crítico el tiempo de compra e instalación de un nuevo activo, pero si el activo si es reparable, se usa el tiempo de restablecimiento, el cual se puede determinar a

partir de las ordenes de trabajo del activo, usando los tiempos de indisponibilidad reportados de las intervenciones que se hayan hecho sobre el activo y que correspondan al modo de falla crítico del activo.

El cálculo del tiempo de restablecimiento o MTTR se realiza como el promedio de los tiempos de reparación (TTR) de cada orden de trabajo (OT), es decir, el promedio de los períodos de Downtime. Estas fechas están condicionadas a que las órdenes de trabajo hayan sido correctamente registradas por los operadores en las centrales.

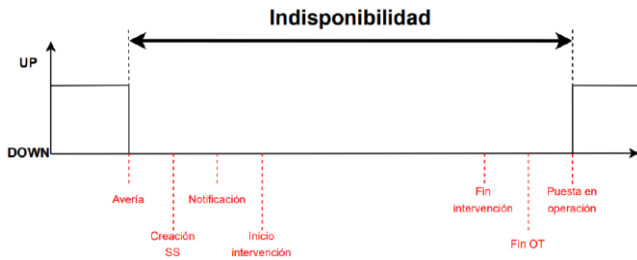


Fig 5. Línea de tiempo de un periodo de indisponibilidad.

Con las fechas de inicio y fin para cada uno de las OT puedo determinar los tiempos para reparar y finalmente con esta información y la cantidad total de órdenes de trabajo se puede obtener el tiempo promedio de restablecimiento como se observa en la ecuación 4.

$$TIEMPO\ REST\ OT = \frac{\sum TTR}{n} \quad (4)$$

Para darle una escala a la consecuencia calidad del activo, se compara su resultado con el tiempo disponible para falla de la central (*Dispfalla*) y se resta un porcentaje por cada nivel de riesgo en el que se ascienda. De esta manera según el tiempo crítico afecte esa disponibilidad tendrá una menor o mayor afectación a la calidad del servicio, ver figura 6.

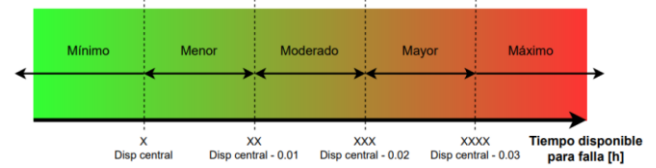


Fig 6. Nivel de comparación del impacto calidad.

Consecuencia reputación: El objeto de impacto reputación es un reto en cuanto a realizar un proceso de automatización según los atributos de los activos, sin embargo, es algo que está directamente ligado a accidentes, pérdidas financieras, desastres naturales y, en general, eventos que están representados en los otros cuatro objetos de impacto. Por lo tanto, la consecuencia en la reputación se define de la siguiente manera:

Tabla 8. Definición de Impacto Reputación.

Nivel de prioridad	Nombre	Descripción
1	Manual	Descrito por el equipo al momento de realizar el análisis
2	Criticidad	Registro en el último análisis de criticidad
3	Cálculo	Cálculo realizado a partir de los otros objetos de impacto

Donde la tercera opción se refiere a un cálculo que tiene en cuenta el objeto de impacto con el nivel de consecuencia más alto, como se ve a continuación:

$$CONSECUENCIA_{Reputacion} = MAX(Consecuencia_i) \quad (5)$$

Y, además:

- $i = Personas, Ambiente, Finanzas, Calidad.$

Consecuencia financiera: Para determinar la consecuencia financiera de manera cuantitativa se suman el valor de ingresos no generados y el valor de reemplazo o reparación.

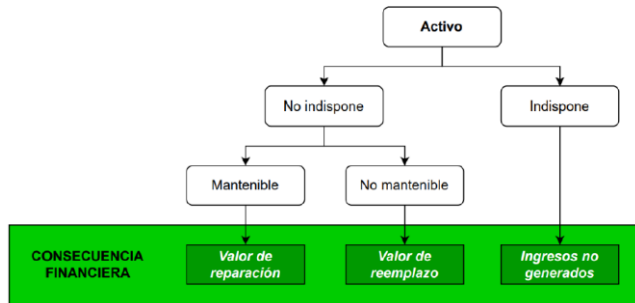


Fig 7. Consecuencia financiera por tipo de activo.

Para los activos con la capacidad de afectar la disponibilidad de generación de energía en una o más unidades de una central hidroeléctrica, el impacto financiero se determina mediante la cuantificación de los ingresos no generados como consecuencia de la falla del activo. Dicha consecuencia se formula como la multiplicación entre el tiempo crítico del activo el costo total por hora de no generar energía.

$$Ingreso\ no\ generado[\$] = T_{critico}[h] \times Costo\ por\ no\ generar\ [\frac{\$}{h}] \quad (6)$$

Para determinar el nivel de afectación financiera que un activo podría generar en caso de falla, se utilizará la matriz que el negocio emplea para estimar los niveles de afectación asociados a distintos eventos. Estos datos dependerán estrictamente de la estrategia y el apetito al riesgo definido por la organización. La figura 8 ilustra gráficamente este concepto, donde A, B, C y D representan valores monetarios establecidos por la organización.

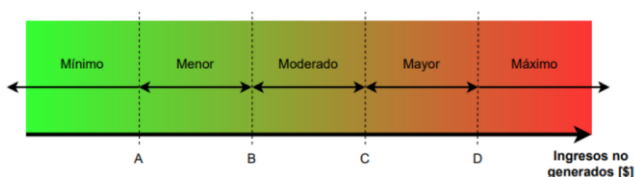


Fig 8. Escala de riesgos financieros.

Cálculo de criticidad: Para realizar el cálculo de criticidad por cada uno de los impactos es posible conectarse directamente a los sistemas de

información como por ejemplo EAM Maximo y archivos planos, y por medio de un BI estandarizar el modelo bajo los criterios descritos anteriormente para cada impacto, para el caso de estudio se hizo uso de QlikSense que fue el BI utilizado para realizar la programación necesaria y consolidación de información para obtener los resultados mostrados en las siguientes figuras.



Fig 9. Tablero del modelo automatizado en QlikSense.

Con lo establecido anteriormente, se obtendrán cinco valores de criticidad, uno para cada tipo de impacto. El valor de criticidad asignado al activo será el máximo entre ellos, dado que todos tienen el mismo nivel de importancia. Esto permite gestionar de manera adecuada los riesgos identificados en las dimensiones de personas, ambiental, calidad, reputación y financiero. Este valor será el que se cargará al sistema EAM y sobre el cual se tomarán, inicialmente, las decisiones relacionadas con los activos.

Resultados

Las ventajas de desarrollar un modelo que permita homologar la criticidad, tal como se describió anteriormente, están relacionadas con la reducción de tiempos, costos y la facilidad de actualización de los datos. Este modelo logró automatizar y evaluar el 98,3% del total de activos clasificados en el negocio de generación hidráulica.

El modelo se implementó en la central hidroeléctrica de Ituango, donde era necesario realizar el análisis de criticidad para todos los

activos, ya que habían sido recientemente creados en el sistema de información. En este proceso, se analizaron 2.200 activos. Al aplicar la metodología, se obtuvieron resultados satisfactorios, logrando reducir los costos del análisis en un 30%. Esto se logró gracias a que toda la información requerida fue diligenciada previamente por el modelo, y únicamente se realizaron talleres para validar los resultados entregados por este. Además, este ejercicio contribuyó al desarrollo de metodologías de mantenimiento que se continuaron aplicando en la central, como el RCM (Reliability-Centered Maintenance) y el RBI (Risk-Based Inspection).

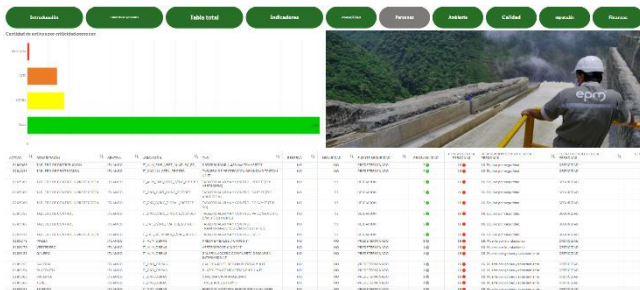


Fig 10. Tablero del modelo automatizado en QlikSense para la central Hidroeléctrica Ituango.

En cuanto a la reducción de costos y la actualización de los datos, se destaca que, tomando como referencia el costo promedio de un modelo con características similares en el mercado, que incluye ingeniería y desarrollo, se generó un ahorro de \$255.943.663, ya que el modelo fue desarrollado con recursos propios. Asimismo, en términos de actualización, el modelo representa una reducción de costos aproximada del 30% en comparación con la realización manual de este ejercicio, lo que equivale a un ahorro estimado de \$45.568.054 cada tres años, el cual es el periodo de actualización de criticidad para activos centralizados.

Conclusiones

Los análisis de criticidad son fundamentales para la toma de decisiones estratégicas, ya que permiten

enfocar los esfuerzos en los activos más críticos, alineando así las acciones con los niveles de riesgo de la organización. Es crucial que estos modelos estén alineados con los objetivos organizacionales, considerando diversos criterios como impacto en las personas, medio ambiente, calidad y aspectos financieros, pudiendo incluso incorporar otros factores relevantes como la reputación de la empresa.

El desarrollo e implementación del modelo presentado demuestra ser una herramienta clave para optimizar la gestión de activos en el negocio de generación hidráulica y otros sectores. Este modelo ofrece ventajas significativas, como la evaluación automática de la criticidad para activos que entren en operación, así como la actualización continua y automática de dicha criticidad en función de análisis previos y datos registrados en el sistema de gestión de activos (EAM).

Adicionalmente, el modelo permite realizar análisis con un mayor nivel de detalle y vincular los resultados con metodologías complementarias, como FMEA, RCM y RBI, fortaleciendo la toma de decisiones en mantenimiento y confiabilidad. Su estructura sistemática facilita la evolución continua, lo que, sumado a su replicabilidad en diferentes negocios, refuerza su aplicabilidad estratégica.

Por último, su sostenibilidad en el tiempo queda garantizada gracias al soporte técnico interno y a su desarrollo en Qlik Sense, lo que asegura no solo la permanencia de la solución, sino también su capacidad de adaptarse a los retos futuros del negocio.

REFERENCIAS

[1] Herrera Herrera, Y. S. (2024). Desarrollo de un modelo homologado para determinar la criticidad de los interruptores de potencia en subestaciones convencionales (Trabajo de grado

de especialización). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

[2] Gaviria-Díez, D. J., Herrera-Herrera, Y. S., & Arango-Cañas, D. L. (2024). Automatización de criticidad para activos de generación hidráulica. Universidad Nacional de Colombia & Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

[3] International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 55001:2014 - Asset management - Management systems - Requirements. Geneva, Switzerland: ISO.

[4] Daquinte L., L., Águila G., J., Pérez R., R., & García A., E. (2018). Metodología de análisis de criticidad integral de las cosechadoras de caña de azúcar CASE IH. Revista Ingeniería Agrícola, 8(2), 55-61. ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761.

[5] Ruiz Franklin, E. (2019). Plan de mantenimiento basado en criticidad para aumentar la disponibilidad de equipos área de producción de conservas de pimiento en la empresa Danper Trujillo S.A.C. [Trabajo de grado, Universidad Cesar Vallejo]. Trujillo, Perú.

[6] Parra, C., Crespo Marquez, A., Parra, J., Viveros, P., Kristjanpoller, F., Gonzalez-Prida, V., & Balda, A. (2021). Técnica de jerarquización de activos MCCR: Matriz de criticidad cualitativa de riesgo. Caso de estudio: Unidad de craqueo

catalítico.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31889.15209/1>

Hoja de Vida

Yster Santiago Herrera Herrera: Soy Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, con especialización en Gerencia de Mantenimiento y auditor líder en ISO 55001. Tengo formación en inteligencia de negocios y analítica de datos, con diplomados en la Universidad EAFIT y UPB.

Con más de 5 años de experiencia en proyectos e ingeniería, actualmente lidero la implementación de análisis de criticidad en los negocios de energía de EPM. Además, apoyo la integración de metodologías de gestión de activos para la toma de decisiones, como salud de activos y condición.

He participado como auditor interno en ISO 55001 y en la medición del grado de madurez de gestión de activos para los negocios de EPM.

1. Nombre del autor: Yster Santiago Herrera Herrera
2. Teléfono
 - a. Celular: 3235803060
3. Dirección del autor(es)
 - a. Residencia: carrera 78#54-20
 - b. Oficina: Carrera 58 # 42 – 125
 - c. E. mail: yster.herrera@epm.com.co
 - d. Ciudad: Medellín
 - e. País: Colombia