

INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS DIGITALES PARA LA GESTIÓN DE ACTIVOS: EL CASO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ALTO ANCHICAYÁ

Luis Alfredo Esteves-Meneses* Emilio Brenes Pereira** Sanderson Pereira Simões de Souza ***
Pedro Wirley Castro* Carlos Mantilla*

*Celsia Colombia S.A. E.S.P

(e-mail: laesteves@celsia.com; pwcastro@celsia.com; camantilla@celsia.com)

**Capris SA, Costa Rica

(e-mail: ebrenes@capris.cr).

***MDM Sistemas, Brasil

(e-mail: sanderson@sistemasmdm.com.br)

Resumen

Este trabajo presenta el proyecto Centro de Diagnóstico Avanzado de Generación (CDAG), implementado en la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá en Colombia, con el objetivo de mejorar la gestión de activos a través de la digitalización. El CDAG permite la visualización de datos operativos y de mantenimiento de los equipos de la planta utilizando tecnologías avanzadas como la realidad aumentada, realidad virtual y realidad mixta, facilitando la toma de decisiones y el mantenimiento de los equipos.

Uno de los componentes clave presentados en CDAG es el uso de un "gemelo digital", el cual representa una copia virtual de los equipos conectada en tiempo real con datos, ofreciendo una representación detallada de la planta, la subestación y la represa. Gracias a esto, los técnicos y el personal directivo pueden comprender mejor el estado operativo de los equipos y tomar decisiones informadas sobre intervenciones necesarias.

Además, el uso de tecnologías de realidad virtual y mixta permite el soporte remoto en tiempo real, permitiendo la colaboración entre expertos sin estar presentes en la planta. También facilita el entrenamiento del personal, mediante hologramas interactivos que replican las máquinas reales,

ayudando a realizar tareas como el desarme y montaje de equipos.

El CDAG está transformando la gestión de activos de CELSIA, adoptando estrategias avanzadas como el mantenimiento predictivo y prescriptivo, que anticipan fallas y optimizan el rendimiento de los equipos.

Introducción

La gestión de activos en las Centrales Hidroeléctricas enfrenta desafíos debido a su antigüedad, en su mayoría superior a los 40 años, su ubicación en zonas de difícil acceso o en áreas de conflicto armado y las fluctuaciones en la demanda que ocasionan arranques y paradas frecuentes. Los arranques de un grupo generador representan esfuerzos de mayor magnitud a los que se tienen en una operación continua, los grupos generadores diseñados y construidos hace más de 40 años fueron concebidos para una operación continua y un número bajo de arranques y paradas, sin embargo hoy en día esa tendencia ha cambiado, por ejemplo, entre 1974 y 1994, los grupos de generación de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá registraron un promedio de 45 arranques por unidad; esta cifra aumentó a 302 entre 1995 y 2024, representando un incremento superior al 600%. Por lo tanto, para que

los grupos generadores funcionen de manera continua y confiable, se deben adoptar planes eficientes de operación y mantenimiento. Además, la adopción de estrategias de Gestión Integrada de Activos es fundamental para lograr este objetivo, y su importancia ha aumentado en el escenario actual, en el que muchas empresas de generación de energía están llevando a cabo proyectos de transformación digital.

En este escenario, la empresa CELSIA implementó el proyecto “Centro de Diagnóstico Avanzado de Generación – CDAG”, cuyo principal objetivo es optimizar la gestión integrada de sus activos, mediante el uso de una única plataforma para concentrar datos de todas las fuentes existentes. e inspecciones predictivas realizadas en la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá. Además, el CDAG también debe diagnosticar automáticamente los modos de falla de los grupos generador-turbina, transformadores y bombas del sistema de enfriamiento. El proyecto CDAG es un ejemplo sumamente avanzado de transformación digital de una Central Hidroeléctrica, con características bastante personalizadas.

Para asegurar el éxito de este ambicioso proyecto, fue fundamental fomentar su adopción colocándolo a disposición del mayor número posible de usuarios de la planta una herramienta con una interfaz amigable. Por ello, entre las alternativas existentes, se optó por utilizar un Gemelo Digital, integrado en el Sistema Automático de Monitoreo y Diagnóstico. Debido a la gran diversidad de datos que era necesario monitorear y utilizar para realizar el diagnóstico, la elección de este sistema fue crucial para el éxito del proyecto. Entre las características principales del sistema, se pueden destacar las siguientes: capacidad de recolectar cualquier tipo de datos, online, offline, estáticos, dinámicos, cuantitativos o sensoriales; disponer de una función de diagnóstico automático configurable por el usuario, utilizando técnicas de Inteligencia Artificial y Conocimientos de Ingeniería; poner todos los datos recopilados, así como los resultados procesados (alarmas, diagnóstico, forma de onda, valores

calculados, por ejemplo) a disposición de otros sistemas utilizando protocolos de comunicación abiertos.

La realidad mixta industrial es un campo en crecimiento que utiliza dispositivos avanzados para combinar elementos de realidad virtual (RV) y realidad aumentada (RA) con aplicaciones enfocadas en entornos industriales y de manufactura. Estos dispositivos están diseñados para mejorar la eficiencia, la productividad y la seguridad en entornos de trabajo industriales. En el caso del CDAG se utilizan diferentes dispositivos que permiten el uso de la Realidad Mixta según la aplicación: casco Hololens, lentes Realwear, tabletas tipo iPad, celulares y cascos Meta Quest.

El uso de tecnología como realidad virtual y realidad aumentada en el proyecto CDAG, ha sido implementada en procesos como:

- Gemelo Digital
- Soporte remoto
- Capacitación

Transformación Digital

Existen varias definiciones para el concepto Industria 4.0, sin embargo, todas tienen en común el objetivo de incrementar la productividad de las actividades industriales a través de la integración de diferentes tipos de tecnologías: inteligencia artificial, internet de las cosas industriales, big data, entre otras. El uso de estas tecnologías en el entorno industrial está impulsando un cambio profundo, al que también se le llama transformación digital.

Esta transformación está haciendo posible utilizar herramientas que antes eran inimaginables. Todos los procesos industriales se están viendo afectados: producción, logística, gestión de activos, formación, por nombrar algunos. La actividad de mantenimiento de activos también se está viendo profundamente afectada. La Industria 4.0 y la transformación digital están permitiendo que las empresas adopten estrategias de mantenimiento extremadamente efectivas, como el mantenimiento predictivo y

prescriptivo. La Fig. 1 presenta un diagrama con varias estrategias de mantenimiento.

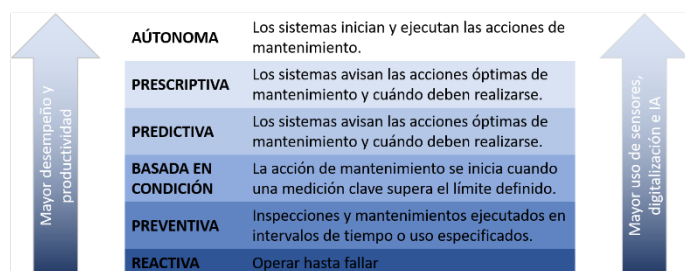


Fig. 1. Estrategias de Mantenimiento

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, las estrategias que garantizan un mayor rendimiento y productividad de los activos son aquellas que requieren el uso intensivo de sensores, digitalización e Inteligencia Artificial (transformación digital).

Gemelo Digital

Entre las herramientas disponibles para la transformación digital, Digital Twin destaca por su gran versatilidad y utilidad. Según Sing, se puede definir como “la copia virtual o modelo de cualquier entidad física (Physical Twin), conectadas entre sí mediante el intercambio de datos en tiempo real”. Su uso se aceleró con la pandemia de COVID-19, ya que permite una visión detallada del activo en tiempo real. Según Kritzinger, el nivel de integración entre los Gemelos Digitales y Físicos varía desde el intercambio manual de datos entre ellos, en este caso se llama Modelo Digital, hasta el intercambio automático de datos, siendo en este caso verdaderamente un Gemelo Digital.

Desarrollo

Como se describió en las secciones anteriores, El CDAG tiene objetivos ambiciosos: presentar en una única interfaz fácil de usar y con un alto nivel de detalle todos los datos recopilados en la Planta:

subestación, casa de máquinas y toma de agua. Además, también se deben presentar las señales procesadas y los modos de falla en desarrollo. Para presentar la complejidad del desafío enfrentado, el alcance del proyecto incluyó la instalación de 405 sensores (proximidad, aceleración, presión, RTD, flujo, TC, TP y otros); más de 56 equipos de redes y adquisición de datos, además de software. Desde el punto de vista funcional, debido a la gran cantidad de información recopilada, se dividió en catorce subsistemas (14) como se muestra en la Fig. 2.

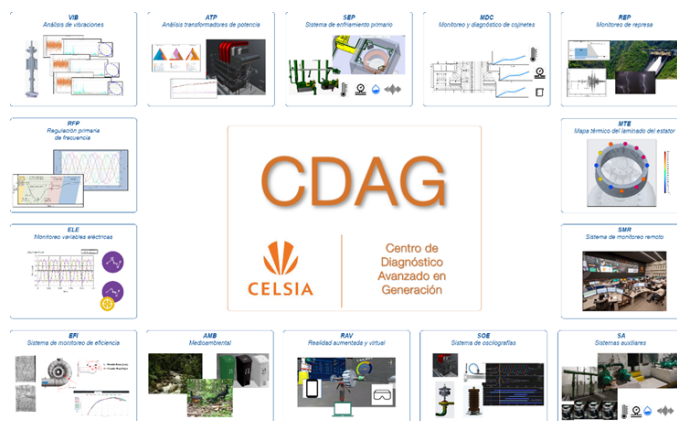


Fig. 2. Subsistemas CDAG

Por lo tanto, se desarrolló un Gemelo Digital para presentar todos los resultados proporcionados por el Sistema. Con esto, se esperaba aumentar la confiabilidad de los activos mediante la adopción de mantenimiento prescriptivo, la simplificación del proceso de mantenimiento y la reducción del esfuerzo de analizar los datos medidos. El sistema conlleva la ejecución de varios procesos, siendo el primero la recolección de datos del equipo, seguido del aprendizaje de la condición normal de operación de cada activo, por punto de operación o su firma. Para ello se utilizan todas las mediciones realizadas y algoritmos especializados, garantizando al Sistema una gran capacidad para detectar en una etapa temprana condiciones anormales de operación y el inicio del desarrollo de modos de falla de cualquier componente del activo. Luego, los datos se presentan

en el Gemelo Digital o se envía una notificación del inicio del desarrollo de modos de falla.

El Gemelo Digital es la herramienta principal del Sistema CDAG, en la que se presentan todos los resultados medidos (valores escalares y formas de onda) y calculados por el Sistema (valores globales, alarmas y diagnósticos) de todas las inspecciones predictivas realizadas en la Planta: análisis de vibración, aceite lubricante, aceite aislante, eficiencia hidráulica, temperaturas, seguridad de presas, rutas de operación, pruebas eléctricas, entre otros. Es decir, el Sistema presenta señales dinámicas obtenidas de unidades de adquisición de datos, rutas de inspección realizadas por operadores o mantenedores, informes generados por laboratorios de análisis y otros sistemas.

Para visualizar datos e interactuar con el Gemelo Digital, el Sistema CDAG cuenta con las herramientas que se enumeran a continuación, las cuales se presentarán con más detalle en las siguientes secciones:

- Avatar;
- Dispositivo para soporte técnico remoto;
- Realidad aumentada;
- Realidad virtual.

La comunicación entre el Sistema Automático de Monitorización y Diagnóstico y el Gemelo Digital se realiza a través del protocolo de comunicación MQTT y un servicio de mensajería (broker). En la práctica, el servicio de mensajería funciona como productor de datos e información que son consumidos por los subsistemas Twin y CDAG. El uso de este tipo de comunicación garantiza una gran confiabilidad en la transmisión de datos, además de cumplir con los requisitos de ciberseguridad mediante un cifrado de 128 bits.

Para desarrollar el gemelo digital, el primer paso fue el levantamiento o creación de un modelo tridimensional de todo el proyecto, tanto los equipos productivos, como la casa de fuerza, galería de transformadores, subestación y represa. Esto implicó una exhaustiva revisión de planos y la realización de mediciones directas en las máquinas. Asimismo, se

contó con un escaneo realizado por un dron utilizando tecnología LIDAR de todo el terreno, de manera que el modelo tridimensional se ubicara en el terreno real.

El sistema de realidad virtual fue desarrollado en la plataforma Unity normalmente utilizada para el desarrollo de video juegos, incorporando módulos de código desarrollados en Java Script y Python. Los modelos tridimensionales, se exportaron como sólidos del CAD y fueron importados a Blender, en donde se le agregaron texturas para acercarse lo más posible a la realidad. Ver Fig.3 y Fig. 4.

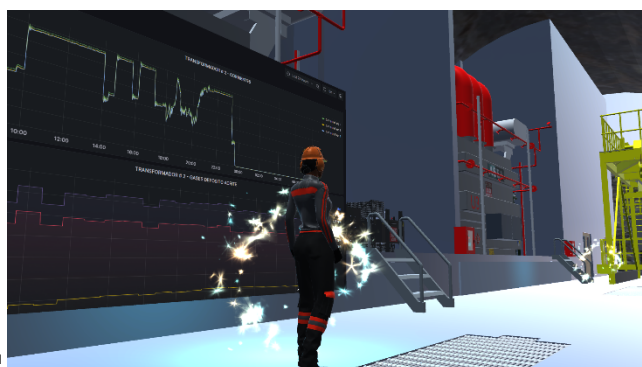


Fig. 3. Presentación datos bahía transformadores

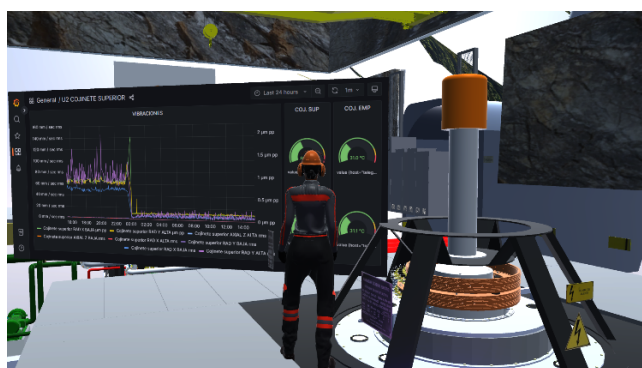


Fig. 4. Presentación datos piso generadores

El módulo incluye un avatar llamado SofIA que permite a los usuarios realizar un recorrido virtual por casa de máquinas, subestación, galería de transformadores, caseta de ingreso al proyecto y represa. En el recorrido, el avatar va presentando la información al usuario según su ubicación en el momento. Tal y como se ejemplifica en la Fig. 3 en

la zona de transformadores, va a presentar datos de los transformadores, tales como: temperatura de aceite, gases disueltos, humedad de aceite, entre otros. En el caso de la Fig. 4, el avatar muestra la información referente a las vibraciones del cojinete superior del generar, temperaturas de cojinete, nivel de aceite, humedad de aceite del cojinete, entre otros datos. El objetivo es facilitar a un operador remoto, realizar recorridos virtuales, y visualizar los datos en tiempo real, para conocer de manera inmediata la condición operativa de cada grupo generador-turbina.

Para aumentar el realismo, el avatar fue diseñado de acuerdo con las características de una persona nativa del Valle del Cauca, en donde se equipó con un esqueleto completo, que le permite caminar y mover sus articulaciones. El uniforme del avatar fue diseñado en concordancia con el estándar actual de CELSIA incluyendo los elementos de protección personal. La Fig. 5 presenta una imagen del avatar SofIA situado en la bocatoma de la represa del Alto Anchicayá.



Fig. 5. Avatar SofIA

Una de las aplicaciones para la realidad aumentada es permitir el soporte remoto y asistencia técnica de especialistas externos a la planta al personal de operación y mantenimiento en planta. Se han desarrollado aplicativos para correr en los cascos Hololens 2 habilitados para esta tarea en planta. Unity contiene una librería de desarrollo compatible con los Hololens que se utilizó para el desarrollo de

los módulos de software que corren en los cascos para soporte remoto. Desde el casco, además de tener disponibles hologramas básicos, el usuario establece comunicación remota con especialistas fuera de planta, a través de una versión embebida del software MS Teams, y también despliega los datos en tiempo real e históricos del CDAG al comunicarse con los módulos respectivos por interfase web (Ver Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10).

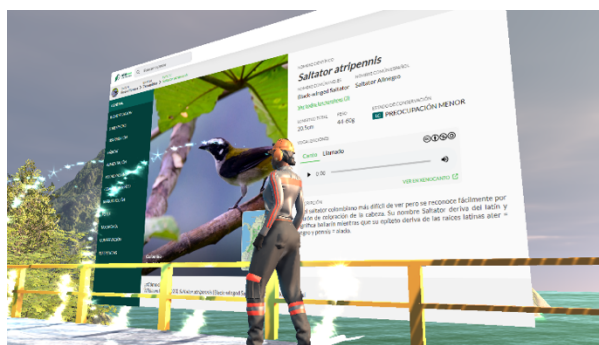


Fig. 6. Presentación datos fauna en represa



Fig. 7. Presentación datos fauna en subestación



Fig. 8. Presentación datos técnicos en subestación

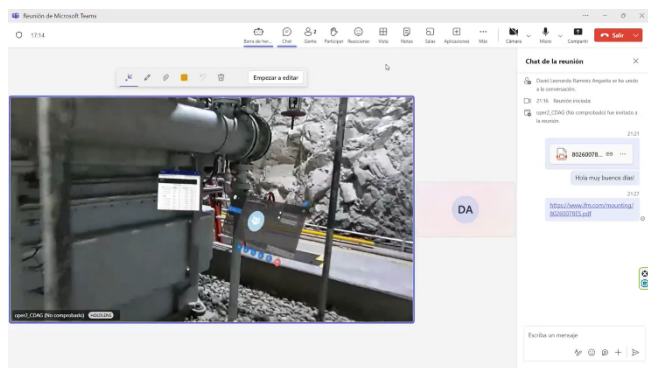


Fig. 9. Conexión remota por MS Teams a planta

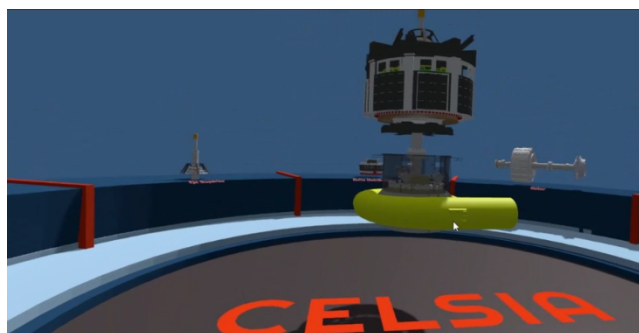


Fig. 11. Holograma grupo generador -turbina

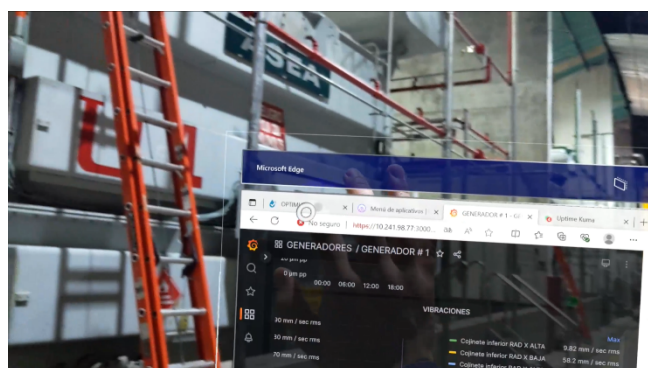


Fig. 10. Hololens - Presentación datos en tiempo real



Fig. 12. Holograma grupo generador -turbina

Como parte del desarrollo también se incorporó una experiencia inmersiva, la cual, corre en los dispositivos Meta Quest 2 con 128 GB, en los cuales se presentan un holograma de la maquina completa, que permite interacción con la misma, como hacer procesos de desarmado y la visualización de los datos en tiempo real. Este tipo de desarrollo es adecuado para el entrenamiento de nuevo personal, y es alimentado con el conocimiento detallado de técnicos e ingenieros con experiencia en la planta. Las Fig.11 y Fig. 12 presentan imágenes de este desarrollo.

Resultados y Conclusiones

Este trabajo describe cómo las Centrales Hidroeléctricas pueden aprovechar una variedad de herramientas digitales para alcanzar niveles de rendimiento sin precedentes. La implementación de estrategias de mantenimiento basadas en la integración de datos disponibles permitirá determinar los períodos óptimos para intervención y actuación. Estos avances son solo algunos de los beneficios derivados de la Transformación Digital que está transformando nuestra sociedad.

a. Democratización de la información

- La Realidad Mixta permite superponer datos en tiempo real sobre el entorno físico, lo que democratiza el acceso a la información al facilitar el entendimiento para personal no técnico, de lo que sucede con los activos productivos.

- Los operadores visualizan información crucial, como el estado de las turbinas, parámetros operativos, estado equipos auxiliares, eficiencia, parámetros eléctricos, vibraciones, etc., en un mismo entorno, sin necesidad de consultar múltiples fuentes de información como pantallas, planos o informes

b. Colaboración Remota

- La Realidad Mixta facilita la colaboración entre equipos de trabajo geográficamente dispersos. Los expertos pueden conectarse virtualmente para resolver fallas soportando al personal de planta, apoyando en labores de pruebas complejas, soportar procesos de cazafallas, apoyar en procesos de mantenimiento o reparación complejas.
- El personal externo tendrá acceso en tiempo real a la misma información que el personal de planta, incluyendo el video de planta.
- El personal puede acceder a manuales, planos, históricos, y cualquier información necesaria para facilitar el proceso de apoyo técnico, todo dentro del mismo entorno de trabajo compartido, sin necesidad de acceder a otras pantallas o fuentes de información.

c. Mantenimiento y atención de averías:

- La realidad mixta permite al personal de mantenimiento y operación acceder en tiempo real a datos tanto de los grupos generador-turbina como equipos auxiliares, así como manuales digitales, datos de rendimiento y guías de solución de problemas.
- La tecnología de realidad mixta permite la detección de problemas y reducción del tiempo de paro.

Referencias

[1] Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N. and Devine, D, “Digital Twin: Origin to Future”, Applied System Innovation, pp 1-20, 2021

[2] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification”, IFAC-PapersOnLine, pp 1016-1022, Volume 51, Issue 11, 2018

[3] Betti, A., Crisostomi, E., Paolinelli, G., Piazzzi, A., Ruffini, F., & Tucci, M. (2019). Condition monitoring and early diagnostics methodologies for hydropower plants. *arXiv preprint arXiv:1911.06242*.

[4] Brito Júnior, G. C. Análise Dinâmica de Mancais Radiais para suporte ao Monitoramento da Saúde Estrutural de Hidrogeradores de Grande Porte. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2017.

[5] Brito Júnior G.C., Machado R.D., Chaves Neto A, et al. Experimental aspects in the vibration-based-condition monitoring of large hydrogenerators. *International Journal of Rotating Machinery* 2017; 2017: 1805051.

[6] Brito Júnior G.C., Machado R.D., Chaves Neto A. Using simplified models to assist fault detection and diagnosis in large hydrogenerators. *International Journal of Rotating Machinery* 2017; 2017: 9258456.

[7] Brito Júnior G.C., Machado R.D, Neto A.C. and Kimura L.Y., A method for the experimental estimation of direct and cross-coupled dynamic coefficients of tilting-pad journal bearings of vertical hydro-generators. *Structural Health Monitoring* 2021, Vol. 0(0) 1–17

[8] Bulloch, J., Callagy, A. (2010). An detailed integrity assessment of a 25 MW hydro-electric power station penstock. *Engineering Failure Analysis*, 17(2), 387-393.

[9] Dorji, U., Ghomashchi, R. (2014). Hydro turbine failure mechanisms: An overview. *Engineering Failure Analysis*, 44, 136-147.

[10] Duparchy, F., Brammer, J., Thibaud, M., Favrel, A., Lowys, P., & Avellan, F. (2017). Mechanical impact of dynamic phenomena in Francis turbines at off design conditions. *Journal of Physics: Conference Series*,



8º CONGRESO MUNDIAL
DE MANTENIMIENTO Y
GESTIÓN DE ACTIVOS



21 · 22 · 23

MAYO · 2025

Centro de Convenciones
Cartagena de Indias · Colombia



Federación Iberoamericana
de Mantenimiento



22º Congreso Iberoamericano de Mantenimiento
27º Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos - CIMGA

[11] Egusquiza, E., Valero, C., Estévez, A., Guardo, A., & Coussirat, M. (2011). Failures due to ingested bodies in hydraulic turbines. *Engineering failure analysis*, 18(1), 464-473.

[12] Georgievskaia, E. (2020). Predictive analytics as a way to smart maintenance of hydraulic turbines. *Procedia Structural Integrity*, 28, 836-842.

[13] Isermann, R. (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing—tutorial paper. *Automatica*, 29(4), 815-835.

[14] Milovanović, N., Sedmak, A., Arsic, M., Sedmak, S., & Božić, Ž. (2020). Structural integrity and life assessment of rotating equipment. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104561.

Luis Alfredo Esteves-Meneses pertenece al equipo de generación hidráulica y eólica de la compañía Celsia Colombia. Cuenta con experiencia en operación y mantenimiento de centrales hidroeléctricas, actualización tecnológica; diseño, desarrollo y retrofit de sistemas de regulación de velocidad para turbinas hidráulicas, sistemas de regulación de tensión para máquinas síncronas y sistemas de control. De profesión ingeniero electricista, cuenta con un M.S. en ingeniería eléctrica. Trabajó como asistente de investigación en diferentes proyectos de la Universidad del Valle - Colombia, actualmente es miembro del equipo de desarrollo del CDAG - centro de diagnóstico de avanzada generación de Celsia.

Emilio Brenes profesional con más de 25 años de experiencia en la coordinación de proyectos de transformación digital. Ha liderado iniciativas en la definición, desarrollo e implementación de procesos utilizando tecnologías avanzadas como Realidad Aumentada (AR), Inteligencia Artificial (IA), Machine Learning (ML), Lógica Difusa y Modelos Matemáticos. En su rol como Líder Negociador y director de Implementación para CELSIA, supervisó el desarrollo de un Centro de

Diagnóstico Especializado basado en AR e IA para la planta hidroeléctrica Alto Anchicayá. Durante este proyecto, dirigió un equipo multinacional y multicultural de profesionales, que incluyó desarrolladores de software, ingenieros de campo, técnicos y especialistas en procesos de generación eléctrica.

Sanderson Pereira Simões de Souza profesional tiene una sólida formación académica, habiendo estudiado todas las disciplinas del Doctorado en Ingeniería Mecánica en la COPPE/UFRJ, además de una maestría en Ingeniería Mecánica con el título de Tesis: "Técnicas de Procesamiento de Señales No Tradicionales para el Diagnóstico de Máquinas Rotativas". Su experiencia incluye dirección de tecnología en la empresa MDM Sistemas, donde lideró proyectos para instalar sistemas de monitoreo y diagnóstico automático en más de 300 unidades generadoras del sector eléctrico. También trabajó en CEPREL como ingeniero mecánico, enfocándose en mantenimiento predictivo y diagnóstico de fallas. Tiene conocimientos avanzados de inglés y ha publicado varios artículos en congresos especializados.

Pedro Wirley Castro Fori, Ingeniero Mecánico con un MBA en Gestión de Activos, líder de centrales hidráulicas en Celsia Colombia S.A. E.S.P. Con más de 13 años de experiencia, experto en gestión de activos para centrales hidráulicas, dragado, tránsito de sedimentos, recuperación de embalses, seguridad de presas y gestión del riesgo.

Carlos Alberto Mantilla Viveros, Ingeniero Mecánico, Msc Ingeniería mecánica. Líder Generación hidráulica y eólica. Gerencia de Generación. Celsia Colombia S.A.E.S.P. Experto en gestión de activos, centrales hidráulicas, embalse, seguridad de presas, gestión del riesgo y activos en centrales hidráulicas.