

INTEGRACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y PRESCRIPTIVO. CASO APLICADO EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ALTO ANCHICAYÁ

Luis Alfredo Esteves-Meneses* Emilio Brenes Pereira** Andrés Antonio Agudelo *
Pedro Wirley Castro* Carlos Mantilla*

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

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

**Capris SA, Costa Rica

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

Resumen

Este trabajo presenta una solución innovadora desarrollada para Celsia Colombia S.A. E.S.P., empresa líder en generación de energía a partir de fuentes renovables, mediante centrales hidroeléctricas, parques eólicos, granjas solares y centrales térmicas, ubicadas en Colombia, Centroamérica y Suramérica.

La solución implementada integra datos de diversas fuentes y procesos en una plataforma unificada, incorporando un sistema de mantenimiento predictivo basado en la condición operativa real de los activos. Lo que permite generar diagnósticos y pronósticos automáticos sobre posibles fallas antes de que ocurran.

Utilizando algoritmos avanzados de lógica difusa e inteligencia artificial, el sistema procesa en tiempo real variables operativas como vibraciones mecánicas e hidráulicas, etc, lo que posibilita prever problemas antes de que impacten en la operación, optimizando la fiabilidad y disponibilidad de los activos.

El mantenimiento predictivo permite realizar intervenciones en los equipos según el desgaste real y la necesidad de servicio, reduciendo así las interrupciones inesperadas. Monitorea variables clave como temperatura, vibración, presión y otros indicadores críticos, que definen la "firma" operativa de los grupos de generación hidroeléctrica, como los instalados en la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá, donde se

implementó el primer sistema. Además, el sistema proporciona una base sólida para el mantenimiento prescriptivo, basado en la infraestructura y datos proporcionados del sistema de diagnóstico.

La solución implementada, denominada CDAG (Centro de Diagnóstico Avanzado de Generación), incluye el desarrollo de modelos matemáticos adaptados a las condiciones operativas reales de las máquinas en la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá. Alimentados con datos en tiempo real, estos modelos permiten simular diversos escenarios operativos y prever posibles fallas. La información generada por los modelos, combinada con el aprendizaje continuo del sistema de diagnóstico, permite al equipo de ingeniería tomar decisiones más informadas y precisas sobre las intervenciones en los grupos generadores, optimizando el control de costos y reduciendo los tiempos de inactividad.

Este enfoque mejora los procesos operativos y marca avance significativo en la implementación de tecnologías predictivas en el sector energético, promoviendo la eficiencia, fiabilidad y sostenibilidad de los activos.

Introducción

La gestión eficiente de los procesos y equipos en las centrales hidroeléctricas es crucial para los equipos de operación y mantenimiento, con el objetivo de optimizar el rendimiento y garantizar altos

estándares de calidad, seguridad y confiabilidad. Este enfoque debe basarse en un proceso continuo de mejora para lograr una operación más eficaz y rentable.

Los equipos de generación hidroeléctrica enfrentan desafíos crecientes 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%. La continuidad operativa depende de un plan de mantenimiento predictivo que permita anticipar fallas, reducir intervenciones innecesarias y maximizar la eficiencia operativa.

Cada grupo de generación hidroeléctrica tiene una "firma única", que determina sus características operativas y de mantenimiento. Este comportamiento específico está influenciado tanto por las características constructivas de la máquina como por las condiciones de la casa de máquinas, la tubería de conducción hidráulica y el embalse. Además, los fenómenos atmosféricos impactan el rendimiento de los equipos a corto y largo plazo. Por ello, es necesario modelar matemáticamente cada unidad para comprender su comportamiento operativo real y tomar decisiones informadas sobre su optimización. Dado que cada generador es único, es fundamental generar modelos individuales y calibrarlos con datos en tiempo real obtenidos de las variables de campo.

El proyecto CDAG (Centro de Diagnóstico Avanzado de Generación) responde a la estrategia de Celsia Colombia S.A. E.S.P., (en adelante CELSIA) de centralizar los datos provenientes de diversas fuentes en la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá, con el objetivo de realizar diagnósticos predictivos de fallas y presentar los resultados a través de una plataforma unificada. Esta solución utiliza un Gemelo Digital, un Sistema de Monitoreo con diagnóstico automático, y se enfoca en abordar dos desafíos clave:

1. **Monitoreo de variables operativas limitado:**
En las centrales de generación de CELSIA, el seguimiento de variables críticas como temperatura y vibración se realiza principalmente a nivel local. Esto impide la supervisión en tiempo real de aspectos clave, como la curva de eficiencia de la turbina y el generador, limitando así la capacidad de optimizar el rendimiento operativo de los equipos.
2. **Cumplimiento normativo de estabilidad:**
Aunque CELSIA cuenta con modelos para el análisis de estabilidad, requeridos por la normativa colombiana del sector eléctrico, la integración de estos modelos con los procesos operativos no es completamente eficiente. Esto destaca la necesidad de una solución que optimice tanto el análisis de estabilidad como la respuesta en tiempo real para garantizar el cumplimiento y la operatividad continua.

El presente proyecto tiene como objetivo continuar con la iniciativa de innovación en procesos de CELSIA, consolidando proyectos anteriores como el Núcleo de Operaciones de Visión Avanzada (NOVA), que permitió la digitalización de los procesos de control de las variables macro de las plantas generadoras, así como los procesos de transmisión y distribución. El CDAG evoluciona y amplía estas iniciativas, fortaleciendo la estrategia de transformación digital en las centrales hidroeléctricas. Su enfoque principal es maximizar

los recursos disponibles y optimizar las operaciones de los equipos de generación de energía eléctrica.

El proyecto busca establecer una innovación continua en los procesos operativos, incorporando un sistema avanzado de monitoreo predictivo que complementa y extiende las capacidades de los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) tradicionales. A través de la evaluación predictiva del estado de los principales elementos del proceso de generación, el CDAG garantiza la confiabilidad, disponibilidad y funcionamiento óptimo de los equipos. Además, la implementación de modelos matemáticos específicos para los grupos de generación, calibrados con datos en tiempo real, permite desarrollar estrategias avanzadas de mantenimiento prescriptivo.

El mantenimiento prescriptivo tiene como objetivo comprender el comportamiento de los equipos ante cambios en las condiciones operativas, lo que permite anticipar posibles fallas y mejorar la eficiencia operativa. Para ello, es crucial contar con un sistema de monitoreo que recopile una amplia variedad de datos operativos y de rendimiento.

El CDAG se destaca por sus características clave:

- Capacidad para recopilar datos en tiempo real, fuera de línea, estáticos, dinámicos, cuantitativos y sensoriales.
- Función de diagnóstico automático configurable por el usuario, basada en técnicas de Inteligencia Artificial y conocimientos de ingeniería.
- Acceso fácil a los datos y resultados procesados (alarmas, diagnósticos, valores calculados, etc.) a través de protocolos de comunicación abiertos, facilitando la integración con otros sistemas.

Las principales funcionalidades de la solución implementada incluyen:

1. Herramientas y algoritmos de diagnóstico y monitoreo en tiempo real de las unidades de

generación hidráulica, que optimizan la gestión del ciclo de vida de los equipos.

2. Herramientas para el desarrollo de un conocimiento más profundo sobre los fenómenos físicos que afectan el comportamiento de los generadores hidroeléctricos, adoptando un enfoque multidisciplinario.
3. Modelos matemáticos detallados para los grupos generador-turbina, que permiten una simulación precisa de su comportamiento operativo.
4. Sistemas avanzados para modelar riesgos y planificar inversiones estratégicas basadas en la información obtenida del monitoreo continuo.

Para el desarrollo del modelo matemático y la comprensión detallada de las condiciones específicas de cada máquina, es necesario recopilar información histórica desde su fase de construcción, complementada con la valiosa experiencia del personal técnico de mantenimiento y operación, quienes poseen un conocimiento profundo de las máquinas. Este proceso se enriquece al integrar los datos obtenidos de los sensores en tiempo real, junto con los análisis de laboratorios externos y las pruebas manuales realizadas en campo. Toda esta información es parte integral del CDAG desarrollado por CELSIA, como se ilustra en la Fig. 1 y Fig. 2.



Fig. 1. Esquema de operación del sistema CDAG

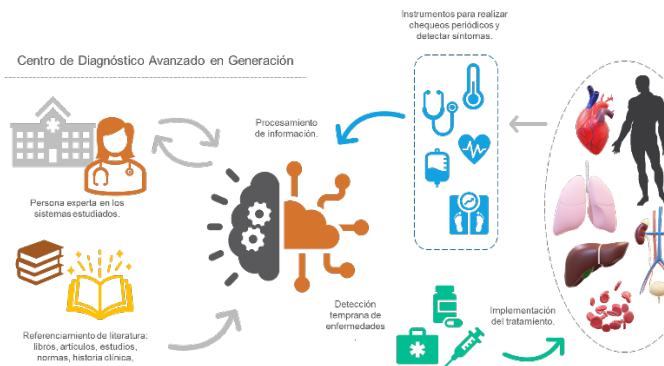


Fig. 2. Esquema funcionamiento CDAG

Proceso de Desarrollo

El desarrollo del proyecto CDAG (Centro de Diagnóstico Avanzado de Generación) fue motivado por los objetivos descritos previamente, lo que llevó a la creación de una solución adaptada a las necesidades específicas del proyecto, dado que no existía una solución prefabricada disponible en el mercado. Para ilustrar la magnitud y complejidad del proyecto, se destacan los siguientes datos clave: se instalaron 405 sensores (proximidad, aceleración, presión, RTDs, caudal, TCs, TPs, entre otros), así como más de 56 equipos de adquisición de datos y sistemas de red en los equipos de producción y auxiliares de la Central hidroeléctrica Alto Anchicayá.

El equipo encargado del desarrollo estuvo compuesto por más de 30 profesionales distribuidos en varias localidades, incluyendo Costa Rica, Colombia, Guatemala y Brasil. Esta diversidad geográfica subraya el carácter multidisciplinario e internacional del proyecto.

El CDAG fue diseñado para centralizar la información proveniente de diversas fuentes en la central, con el fin de realizar diagnósticos predictivos de modos de falla, alimentar modelos matemáticos y presentar los resultados a través de una plataforma unificada. El objetivo principal es aumentar la confiabilidad de los activos de la central, simplificar los procesos de mantenimiento y reducir la carga de

análisis de datos al consolidar toda la información relevante en un solo sistema. Este enfoque también facilita un modelado más preciso del comportamiento de los equipos.

Un desafío importante fue el desarrollo del modelo matemático, dado que las máquinas de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá fueron instaladas en 1974. La primera etapa del proceso consistió en la creación de un modelo tridimensional para cada grupo de generación, lo cual requería que el modelo se ajustara con precisión a las características físicas de los equipos. Esto implicó una exhaustiva revisión de planos y la realización de mediciones directas en las máquinas.

Una vez construido el modelo tridimensional, se procedió a la recopilación de datos para desarrollar un conjunto de ecuaciones diferenciales que sirvieron para formular un modelo simplificado con 10 grados de libertad, capaz de simular el comportamiento vibratorio de las máquinas en función de los datos de diseño y datos extraídos del modelo tridimensional. El modelo simplificado se detalla y visualiza en la Fig. 3.

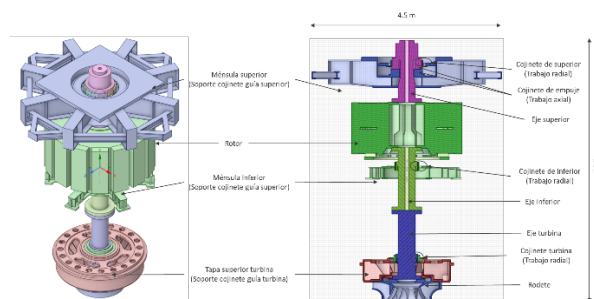


Fig. 3 Modelo Simplificado

Calibración y Desarrollo del Modelo Matemático

El proceso de calibración del modelo matemático fue realizado en el software MATLAB, utilizando datos en tiempo real proporcionados por los sensores instalados en la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá. A continuación, se detallan los sensores clave y parámetros considerados en la validación y ajuste del modelo:

- **Vibración Absoluta:** Para la medición de la vibración absoluta, se utilizaron acelerómetros piezoeléctricos con una sensibilidad de 500 mV/g, precisión de $\pm 10\%$, y un rango de frecuencia de 0.6 Hz a 10 kHz. Los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá operan a una velocidad de 450 RPM y cuentan con tres cojinetes. En cada cojinete se instalaron tres acelerómetros mono-axiales (uno por eje) para evaluar la vibración en los ejes X, Y y Z.
- **Vibración Relativa:** La vibración relativa se cuantificó mediante sensores inductivos con un rango de medición de 0.2 mm a 3.5 mm y una salida de 4-20 mA, lineales a lo largo de todo el rango de medición. Dos sensores inductivos fueron instalados por cojinete para medir las vibraciones en los ejes X y Y, cubriendo así los principales movimientos relativos de los componentes.
- **Velocidad de Giro:** La velocidad de rotación fue medida mediante un sensor inductivo con un rango de 0.2 mm a 3.5 mm, con salida lineal de 4-20 mA, lo que permitió obtener datos precisos de la velocidad de giro para alimentar el modelo matemático.
- **Temperatura cojinetes:** La temperatura de metal y del aceite de cada cojinete se midió utilizando sensores tipo RTD PT 100.
- **Presión:** Para medir las presiones en puntos críticos de la máquina, se utilizaron transmisores de presión piezorresistivos con una exactitud de $\pm 0.25\%$, un tiempo de respuesta inferior a 1 ms y salida lineal de 4-20 mA. Los puntos de medición incluyeron:
 - Ingreso al caracol (rango: 0 a 100 BAR)
 - Presión alta caracol (rango: 0 a 100BAR)
 - Presión baja caracol (rango: 0 a 100BAR)
 - Presión a la salida del caracol (rango: -1 a 10 BAR)
- **Variables Operativas del SCADA:**
 - Nivel del embalse
 - Nivel de desfogue
 - Potencia activa
 - Posición de los álabes

Consideraciones en el Diseño del Sistema

En el diseño del sistema de monitoreo y calibración, se priorizó el uso de los datos más recientes proporcionados por el fabricante del grupo generador 3, dado que estos ofrecían una base más precisa y controlada para el análisis. Los modelos generados a partir de este grupo sirvieron como referencia para el desarrollo de modelos similares para los otros dos grupos generadores de la central.

Desarrollo del Modelo en ANSYS

Una vez calibrado el modelo en MATLAB, con las ecuaciones ajustadas a las condiciones reales de la máquina y complementadas por datos obtenidos mediante un análisis estructural por elementos finitos del modelo tridimensional, se procedió al desarrollo de un análisis dinámico por elementos finitos, todos estos empleando el software ANSYS. Con esto se aumenta el número de grados de libertad y se obtienen resultados con mayor precisión del comportamiento dinámico de los grupos generadores. El modelo mejorado permitió un análisis más completo de las interacciones entre los componentes del sistema y su respuesta ante variaciones operativas.

En las Fig. 4 y Fig. 5 se ilustra un ejemplo del modelo desarrollado para el grupo 3 de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá. En esta se destacan los avances en la simulación precisa de los fenómenos físicos que afectan la operación de los grupos generadores.

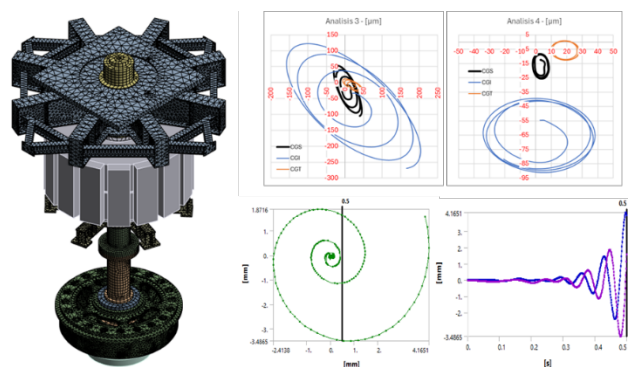


Fig. 4. Análisis dinámico Grupo 3

Resultados y Conclusiones

El Centro de Diagnóstico Avanzado de Generación (CDAG) es un sistema en continuo desarrollo y mejora, con algoritmos que deben ser entrenados en función de las variaciones de las condiciones operativas de las máquinas. El periodo de entrenamiento es variable y depende de las características específicas de cada planta. En el caso de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá, se espera que este proceso tome aproximadamente dos años. A pesar de ello, los avances obtenidos hasta la fecha han proporcionado valiosa información para el personal de mantenimiento. A continuación, se detallan algunos de los resultados obtenidos:

Desarrollo del Modelo Matemático para el Grupo Generador

Se desarrolló un modelo matemático ajustado para el grupo generador, utilizando datos en tiempo real obtenidos de la máquina y parámetros derivados de la modelación por elementos finitos. La Fig. 5 ilustra los modos de vibración característicos del grupo generador, proporcionando una visión detallada de su comportamiento dinámico.

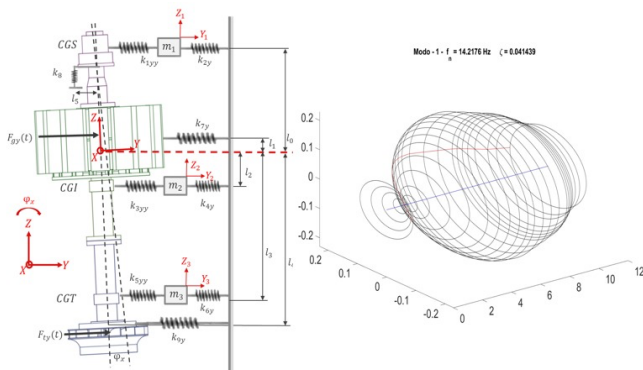


Fig. 5. Modos de vibración Grupo 3 modelo matemático

Mejoras en las Vibraciones

El sistema de monitoreo y diagnóstico ha permitido identificar las condiciones vibratorias y facilitar la implementación de mejoras significativas durante las intervenciones de

mantenimiento del grupo generador. Los resultados evidencian una notable reducción en las vibraciones, lo que respalda la eficacia de las intervenciones realizadas. La Fig. 6 muestra el diagnóstico de las vibraciones destacando la disminución en las mismas en el tiempo que lleva el sistema CDAG operativo.

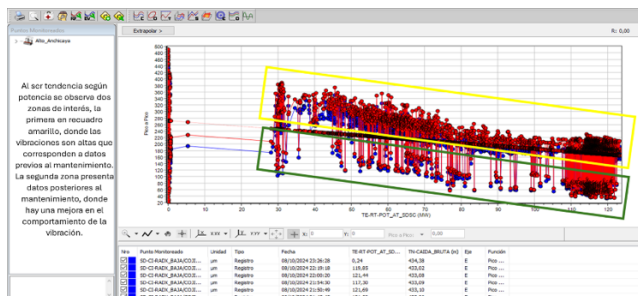


Fig. 6. Diagnóstico de vibraciones grupo 2

Modelo de Mantenimiento Prescriptivo

El modelo de mantenimiento prescriptivo se alimentará del modelo matemático ajustado y de datos en tiempo real, incluyendo cambios en las condiciones operativas, como el nivel del embalse y la apertura de los álabes. Este enfoque permitirá determinar las condiciones de estrés y el comportamiento de los equipos bajo diferentes condiciones operativas. La información generada será clave para que el personal de mantenimiento y operación pueda optimizar la gestión de los equipos, reducir el desgaste de los componentes, minimizar la incidencia de fallas imprevistas y aumentar la disponibilidad operativa de los generadores.

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] Kritzing, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sih, 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., Piazza, 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*,

[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.

Pedro Wirley Castro Fori, Ingeniero Mecánico con un MBA en Gestión de Activos, líder de centrales



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

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.

Andres Antonio Agudelo Castillo, Ingeniero Electromecánico, especialista en automatización industrial, Programación y mejora al mantenimiento hidráulicas en Celsia Colombia S.A. E.S.P. Con más de 8 años de experiencia,

experto en gestión de activos para centrales hidráulicas.

Carlos Alberto Mantilla Viveros, Ingeniero Mecánico, Msc Ingeniería mecánica. Lider 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. Celsia Colombia S.A. E.S.P.