

CONTROL DE VÓRTICE CAVITANTE EN HIDROGENERADORES A TRAVÉS DE MONITOREO DE VIBRACIONES

PRESENTACIÓN DE CASO: TURBOGENERADOR
FRANCIS EN COLOMBIA



Realizado por:

Daniel Eduardo Armenta Castillo

Ing. Analista de vibraciones de A-MAQ SA

RESUMEN

El presente artículo resalta los **resultados de la implementación de tecnologías de monitoreo de condición en centrales hidroeléctricas de Colombia** como una herramienta fundamental para visualizar la hidrodinámica de los **turbogeneradores Francis** y la efectividad del sistema de aireación del rodete, su relación con la eficiencia mecánica de la máquina y el impacto en la vida disponible de los elementos que la componen.

INTRODUCCIÓN

Bien es sabido que el pilar de la generación eléctrica en nuestro país es la transformación de la energía potencial disponible en nuestros recursos hídricos. **Colombia cuenta con generación hidráulica desde el año 1891**, desde que entró por primera vez en operación la planta de Chitotá en zona rural del municipio de Bucaramanga, y hasta la actualidad se ha demostrado la viabilidad de los proyectos hidroeléctricos como componente fundamental para el crecimiento económico del país.

Las centrales hidroeléctricas constituyen el 70% del parque de generación de energía en Colombia. Los turbogeneradores son los activos con mayor criticidad de una central ya que se encargan de producir la electricidad, la estrecha relación

proporcional entre Horas de Operación vs. Productividad y, teniendo en cuenta que aproximadamente **la mitad de las hidroeléctricas colombianas tienen instaladas turbinas tipo Francis**, hace reflexionar sobre la importancia de implementar buenas prácticas de ingeniería del mantenimiento que permitan aumentar la confiabilidad en la operación y garantizar la disponibilidad máxima de estas máquinas, en especial las de mayor edad.

La planeación del mantenimiento debe ser objetiva y enfocarse en mejorar condiciones que permitan **optimizar la eficiencia mecánica en la operación**, predecir a tiempo las posibles condiciones de falla potencial y maximizar la vida disponible de los elementos de estas máquinas. Las actuales **tecnologías de monitoreo continuo multicanal de vibraciones se han convertido en una herramienta esencial para visualizar la dinámica** en regímenes transitorios y de estado estable durante la operación de un turbogenerador hidráulico y contar con datos suficientes para poder determinar el punto de óptima eficiencia mecánica durante la operación.

PRESENTACIÓN DEL CASO: VÓRTICE CAVITANTE EN HIDROGENERADOR CON TURBINA FRANCIS

De todos los posibles fenómenos que se pueden presentar en las máquinas hidráulicas, la cavitación es el más crítico.

La cavitación se discrimina en diversos tipos según su naturaleza y la fuente que la origina, pero **el caso más frecuente en turbogeneradores Francis** es la producida por **vórtices**. Cuando los torbellinos **cavitantes aparecen en el tubo de aspiración se denomina cavitación de antorcha**, y cuando aparecen vórtices paralelos en el flujo que circula cerca de las superficies curvas por los canales del rodete se le conoce como **cavitación por vórtice a carga parcial**.



Vórtice cavitante en rodete Francis

Así, debido a la cavitación de los torbellinos desprendidos, finalmente logran situarse a partir del borde de salida de los álabes y a esta condición se le conoce como **cavitación por desprendimiento de vórtices de Von Karman**.

Cualquiera sea el caso, la presencia de **vórtices cavitantes en la dinámica va a representar todos los riesgos asociados al desarrollo de procesos erosivos**, inestabilidades en carga parcial, vibraciones, ruidos y caída del rendimiento general de la máquina, condiciones totalmente indeseables en un panorama donde se busca llevar al máximo la vida disponible de los activos.



Rodete erosionado por cavitación

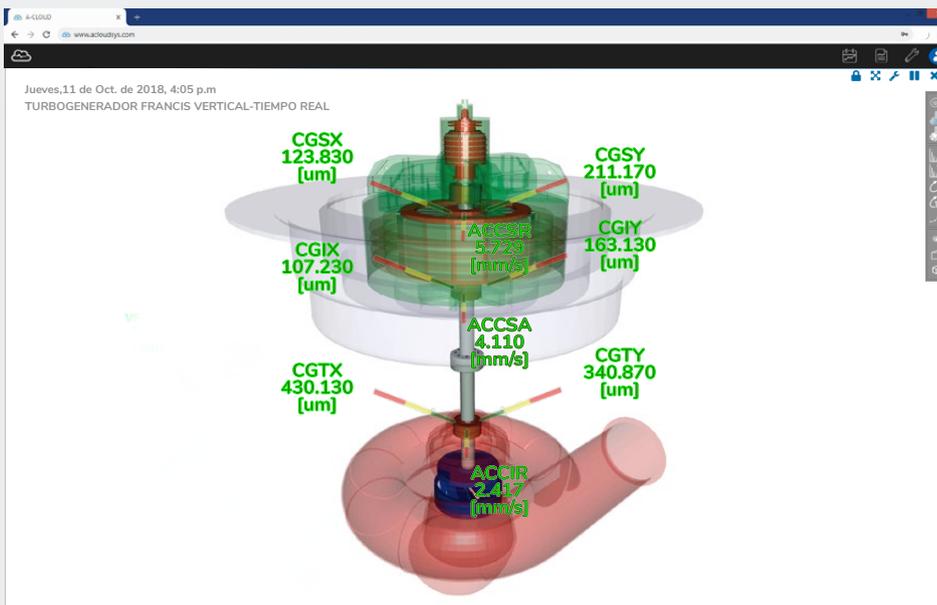
Se ha demostrado que los sistemas de aireación en **las turbinas actúan de manera eficaz para corregir los vórtices y regular las pulsaciones de presión en el rodete**. Las turbinas hidráulicas más modernas poseen sistemas de control avanzados que monitorean diversas variables durante la operación, inteligentemente regulan la entrada de aire al rodete con válvulas automáticas de aireación, garantizando que la máquina opere en su máximo punto de eficiencia. Sin embargo, el número de proyectos hidroeléctricos con tecnología de punta en Colombia es limitado y la condición de eficiencia que presumen la mayoría de turbogeneradores se mantiene actualmente en el plano de la operación manual.

Se ha demostrado que los sistemas de aireación en **las turbinas actúan de manera eficaz para corregir los vórtices y regular las pulsaciones de presión en el rodete**. Las turbinas hidráulicas más modernas poseen sistemas de control avanzados que monitorean diversas variables durante la operación, inteligentemente regulan la entrada de aire al rodete con válvulas automáticas de aireación, garantizando que la máquina opere en su máximo punto de eficiencia. Sin embargo, el número de proyectos hidroeléctricos con tecnología de punta en Colombia es limitado y la condición de eficiencia que presumen la mayoría de turbogeneradores se mantiene actualmente en el plano de la operación manual.

Grabación Multicanal de sensores de proximidad y acelerómetros de A-MAQ

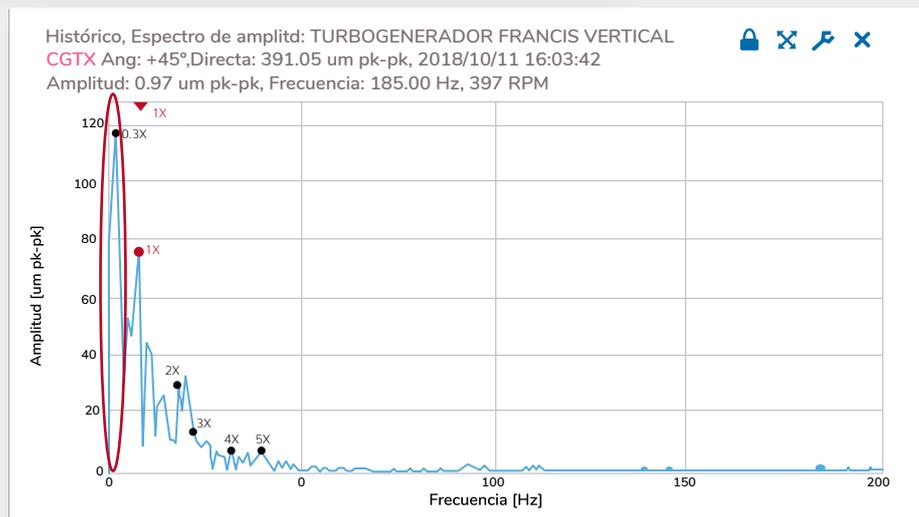


Se dio inicio a la prueba. El software analizador A-CLOUD comenzó a grabar datos cada segundo y la máquina fue encendida, el eje alcanzó rápidamente su velocidad nominal y la estabilidad térmica surgió luego de 4 horas de operación. Sin embargo, desde el inicio de la prueba inquietaba los altos niveles de vibración de todos los puntos, y al observar los espectros de los sensores de proximidad se pudo notar claramente excitación del pico a 0.3x de la frecuencia de giro de la máquina, el cual es un indicativo de la presencia de vórtices cavitantes en la hidrodinámica del flujo.



Gemelo digital Turbogenerador francis en el que se evidencia altos niveles de vibración

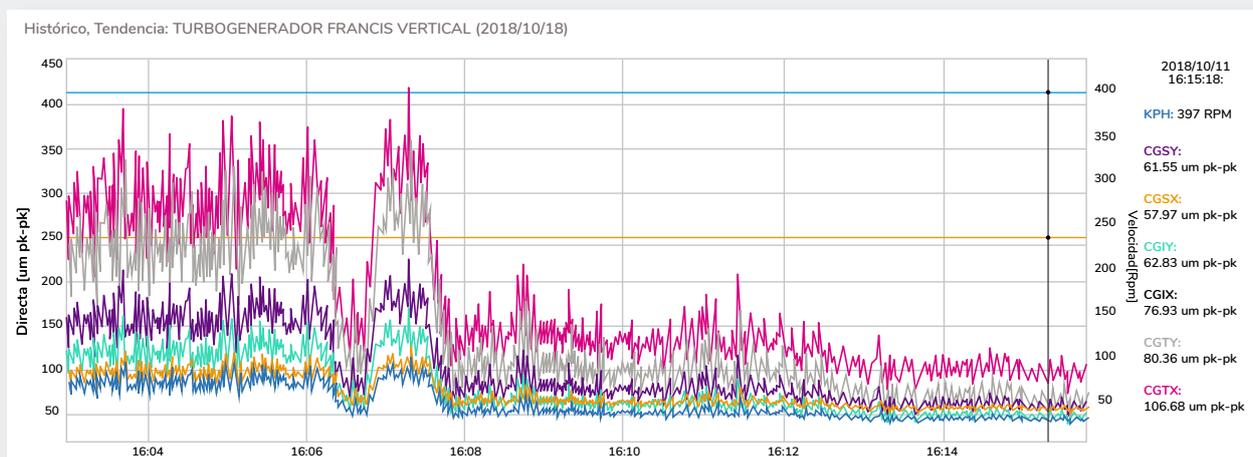
Espectro de velocidad Cojinete Guía Turbina en X.



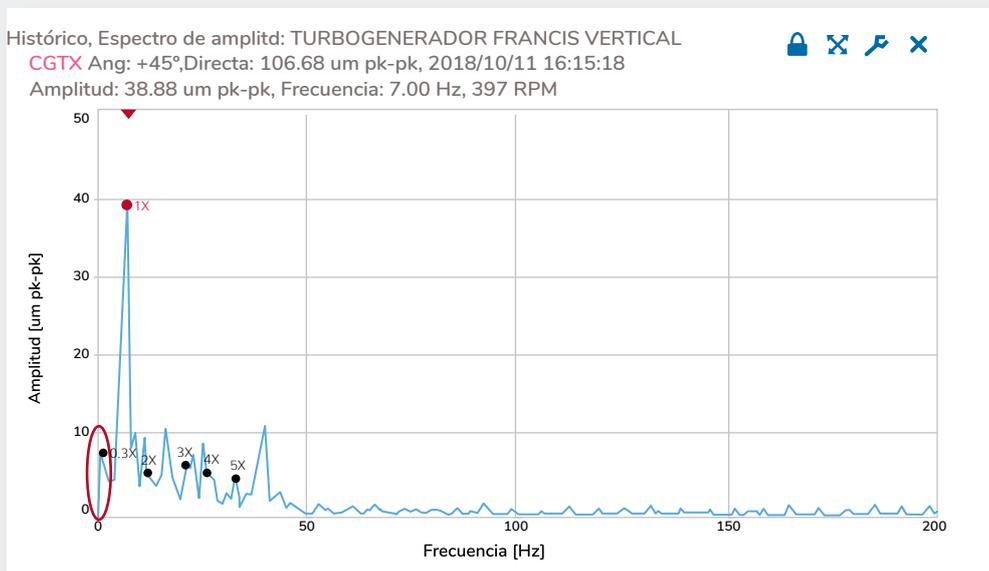
La condición observada fue informada al cliente y se realizó una verificación de las posibles causas del fenómeno. Revisando los protocolos de operación **se detectó que la válvula de aireación estaba completamente cerrada, lo cual consideramos irregular** y en este sentido se propuso realizar pruebas de aperturas parciales de la válvula con el fin de mejorar la condición dinámica.

Las pruebas de aperturas parciales se realizaron y fue así como se observó en **tiempo real el cambio en la condición, los niveles de vibración disminuyeron drásticamente** a razón de la apertura de la válvula, los espectros evidenciaron una drástica disminución en el nivel de vibración asociado a la frecuencia del vórtice y se determinó el régimen de aireación requerido – **porcentaje de apertura de la válvula** – para mantener la máquina en el punto de mejor eficiencia durante la operación.

Cambio de amplitud durante prueba de aperturas de la válvula de aireación.



Espectro luego del ajuste de la válvula de aireación.



CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

El análisis en el ejemplo anterior nos permite reconocer al **monitoreo de vibraciones como una herramienta eficaz** para comprender la dinámica de los turbogeneradores Francis, observar a detalle los fenómenos hidráulicos que se puedan presentar en régimen transitorio como **la cavitación y mejorar la confiabilidad en la operación**, con gran potencial de aplicación a todas las centrales hidráulicas en Colombia, pero con mayor énfasis para las máquinas más longevas.

De esta manera, **el monitoreo continuo en línea es la solución de industria 4.0** más efectiva para la gestión de confiabilidad en turbogeneradores, ya que permite **visualizar la tendencia histórica de la máquina, disponer de un panorama más detallado de las posibles condiciones de falla** y su evolución en el tiempo, con la facilidad de poder diagnosticar la condición de operación desde cualquier dispositivo con acceso a internet. Actualmente, los desarrollos en inteligencia artificial permiten disponer de softwares de diagnóstico automático inteligente que facilita la interpretación de los datos y asiste para **avisar tempranamente sobre las posibles fallas y mejora la efectividad en los diagnósticos**.

