



JIDeTEV

JORNADAS DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, EXTENSIÓN,
VINCULACIÓN Y MUESTRA DE LA PRODUCCIÓN



Vol11-Año 2020-ISSN 2591-4219

Modelo Estadístico para Señales de Cavitación en Turbinas Hidroeléctricas

Gastón Damián Solonyezny^{a, c*}, Javier E. Kolodziej^{a, b}, Facundo E. Gonzalez^{a, c}

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica (GID-IE), IMAM, UNaM-CONICET, Facultad de Ingeniería, Oberá, Argentina*

^c *LABSE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina*
e-mails: solonyezny@gmail.com, fakgonzalez@gmail.com, koloj@fio.unam.edu.ar

Resumen

Este trabajo busca aportar herramientas para la evaluación de algoritmos y métodos asociados a la detección de cavitación en turbinas Kaplan verticales, para lo cual se ensaya un modelo estadístico que vincula las características de la máquina con las alteraciones producidas por dicho fenómeno hidrodinámico. Si bien la implementación del mismo aún se encuentra en desarrollo, permitirá sintetizar señales de presión de turbinas en la región del anillo de descarga. El objetivo final es poder reproducir las características de las señales reales, reconociendo los niveles de cavitación a través de señales y contar con una diversidad de datos que permita evaluar el desempeño de los algoritmos considerando distintas condiciones de operación de la turbina.

La validación del modelo se realiza mediante comparación con señales reales obtenidas de un banco de ensayos en el laboratorio de Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata. Para cuantificar la semejanza entre señales se utiliza la correlación entre ambas.

Palabras Clave – Cavitación, Ensayo de algoritmos, Modelo estadístico, Señales sintéticas

1. Introducción

La generación de energía en el mundo mediante centrales hidroeléctricas alcanza el 16 % de la producción total, con previsiones de obtener una capacidad de generación de 1,9 TW para el año 2.050. Si durante el 2.017, se hubiera reemplazado la generación hidráulica por combustibles fósiles, aumentarían en 4 billones de toneladas los gases de efecto invernadero [1],[2]. En Argentina, la producción de electricidad por este medio fue del 29 % durante el año 2.018, con un pico de 37 % en el mes de Noviembre [3]. La proyección para el año 2.030 a nivel nacional es de aumentar la potencia hidroeléctrica instalada en 2,9 GW por medio de tres represas en el Condor Cliff, La Barrancosa y Chihuido I; una en San Juan: El Tamboar; una en Mendoza: Portezuelo del Viento; y la ampliación de una represa ubicada en Corrientes: Yacyretá y un vertedero Aña Cuá [4]; en todos los casos, utilizando turbinas del tipo Francis o Kaplan. La primera de ellas se emplea para elevadas potencias de salida con saltos de agua entre 15 m y 700 m; mientras que la turbina Kaplan es preferida para saltos menores a 50 m y grandes caudales de descarga. Esta última resulta interesante para analizar por su capacidad para trabajar en distintos puntos de operación con rendimientos elevados, ajustando tanto el ángulo de incidencia de los álabes del rodete como la apertura del distribuidor [6]. Sin embargo, la curva de rendimiento puede verse afectada por fenómenos hidrodinámicos, los cuales a su vez, pueden comprometer la integridad estructural en la turbina. En este sentido, la cavitación es uno de los principales efectos que se debe minimizar por su gran poder destructivo; en las turbinas Kaplan se manifiesta erosionando regiones del anillo inferior, en las zonas de succión de los álabes cerca de la periferia y en el cubo del rodete [7]; además, causa vibraciones, resistencia hidrodinámica, modificaciones en las líneas de flujo y produce emisión acústica [8].

La detección de cavitación en máquinas reales se vale de las señales físicas inducidas por el fenómeno, cuya propagación y comportamiento dependen de la instalación de la turbina, su modo de operación y el tipo de cavitación [9], [10]. La banda en la que se caracteriza este fenómeno comprende desde los 5 kHz hasta 1 MHz, presentando su mayor concentración de energía entre los 10 kHz y 700 kHz. Sin embargo, para los fines prácticos se obtiene la firma de cavitación entre los 10 kHz a 20 kHz [11], utilizando principalmente mediciones hidroacústicas o señales de vibración que provienen de acelerómetros y sensores de presión [9]. Las estrategias empleadas al realizar la medición incluyen: un sensor con ancho de banda acotado mediante filtros pasa banda; una combinación de sensores para detectar cavitación en baja y alta frecuencia; un

La literatura del área se concentra básicamente en el análisis de las señales de cavitación, que se emplea en el monitoreo de las turbinas hidroeléctricas y en bombas centrífugas, y generalmente comprende la determinación del valor RMS, o la obtención del espectro. Los juicios sobre el comportamiento se realizan cualitativamente a partir de la comparación del estado de funcionamiento con una referencia adoptada [13]. Voith Hydro, una de las referencias en el monitoreo e instalación y seguimiento de turbinas hidroeléctricas de gran porte, presenta una estrategia de monitoreo que acusa cuatro niveles de cavitación: zona de no cavitación, cavitación incipiente, cavitación moderada, y cavitación severa; para ello, analiza emisiones acústicas ultrasónicas y realiza un conteo de los picos observados en el espectro de potencia, desde los 100 kHz hasta los 280 kHz. En la continuación obtiene un valor englobador, y compara con parámetros obtenidos de ensayos previos en dicha turbina [14]. Sin embargo, también existen abordajes a tasas de muestreo mucho menores, con sensores más económicos [15].

Lo expuesto motiva a incursionar en otras estrategias de procesamiento para detectar cavitación en turbinas hidroeléctricas y fallas incipientes; principalmente el hecho de lograrlo utilizando sensores de vibraciones que ya se encuentren instalados en las máquinas, lo que representa un valor agregado para los sistemas de seguimiento de condición. Cabe resaltar que los sensores de vibración usualmente se instalan en las regiones de los álabes del rodete y tubo de aspiración, consistiendo en medidores de presión, acelerómetros y de ultrasonido, siendo este último menos común que los anteriores.

En este trabajo se pretende obtener un modelo matemático que permita sintetizar señales de presión provenientes de la región del tubo de aspiración de una turbina hidroeléctrica considerando diferentes condiciones de cavitación. Este modelo puede ser utilizado como una herramienta para el ensayo de estrategias de procesamiento de señales. Las principales ventajas que se obtienen con el modelo matemático son, por un lado, la capacidad de evaluar el comportamiento de los algoritmos para diferentes entradas con características propias del fenómeno a determinar, teniendo certeza de las condiciones que deberían ser detectadas; y por otro lado, la posibilidad de generar un conjunto de señales que permitan obtener resultados independientes entre sí. Al utilizar únicamente señales reales pero limitadas tanto en cantidades como en puntos de operación, la verificación de los métodos puede resultar sesgada a una condición de operación particular.

Las señales obtenidas por el modelo ensayado, son contrastadas con señales reales en condiciones de cavitación obtenidas del banco de ensayos de turbinas de la Universidad Nacional de La Plata.

turbina. La combinación de estas señales, representa la relación entre el rotor y el estator turbina.

La señal de presión sintetizada para el modelo matemático propuesto [16], se plantea como señal portadora donde se presentan todas las frecuencias características de la máquina y su forma de onda, relacionando los parámetros constructivos con su geometría y funcionamiento; además de la señal de cavitación propiamente dicha, la cual será referida como señal modulante y depende principalmente de parámetros estadísticos asociados a la cantidad de picos y características de los mismos. La combinación de las partes se obtiene luego como producto de ambas, para lo cual la relación de escalas toma un papel protagónico en establecer la presencia de cavitación en la característica de la máquina.

En esta etapa, no se contempla el camino recorrido por la señal desde la implosión de las burbujas de cavitación, hasta la ubicación del sensor. En el artículo de referencia, el mismo se modela como una señal de ruido blanco filtrado mediante filtros pasabandas IIR.

2.1. Señales Características del Turbogruppo

La señal de presión observada por paso de álabe puede ser modelada en función de la posición y rotación como se presenta en la ecuación (1)

$$m_B(\theta) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} B_i e^{jbi\theta}$$

donde B_i representa coeficientes de la serie de Fourier asociados a los diferentes órdenes de rotación de la máquina y b representa la cantidad de álabes del rodete. Mientras que la señal asociada al distribuidor puede representarse por la expresión (2)

$$m_C(\theta) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_i e^{jvi\theta}$$

Teniendo en cuenta que las señales que están siendo utilizadas para ajustar el modelo provienen de un tipo de turbina que posee 5 álabes y 24 paletas directrices y que posee una frecuencia de rotación de 1.000 rpm, y utilizando los coeficientes de Fourier que se presentan en el artículo, las ecuaciones (1) y (2) toman la forma que se presenta en (3)

$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{N_k} P_{kn} \cdot \exp(-|t - k \cdot T - \varphi_{kn}| / \theta_{kn})$$

Donde N_k es un número aleatorio de pulsos que se producen en el grupo k th, P_{kn} es un tamaño aleatorio que representa el pico de presión del n th pulso del k th grupo, φ_{kn} es la distribución aleatoria del pulso n th en el k th grupo y θ_{kn} es la constante de tiempo aleatoria del pulso correspondiente al grupo k th.

Para el modelado, se considera que todas las variables aleatorias son independientes y se calculan según el siguiente criterio: Se utiliza una distribución de Poisson para el cálculo de N_k con media igual 20, y las variables P_{kn} , φ_{kn} y θ_{kn} , se asumen distribución normal considerando los siguientes valores: media de picos $\mu_P = 3 \times 10^5$ Pa, varianza de picos $\sigma_P = 7,5 \times 10^4$ Pa, media de separación $\mu_\varphi = 1 \times 10^{-3}$ s, varianza de separación $\sigma_\varphi = 1 \times 10^{-2}$ s, media $\mu_\theta = 1 \times 10^{-2}$ s, y varianza $\sigma_\theta = 26 \times 10^{-6}$ s.

3. Resultados

Para los valores propuestos anteriormente, las señales relacionadas al paso de álabes y paletas del distribuidor pueden ser observadas en las Fig. 1.A y B; mientras que la forma de onda de la señal de cavitación y la interacción total de ellas correspondientes a la relación rotor estator presentan mediante la Fig. 2.A y B.

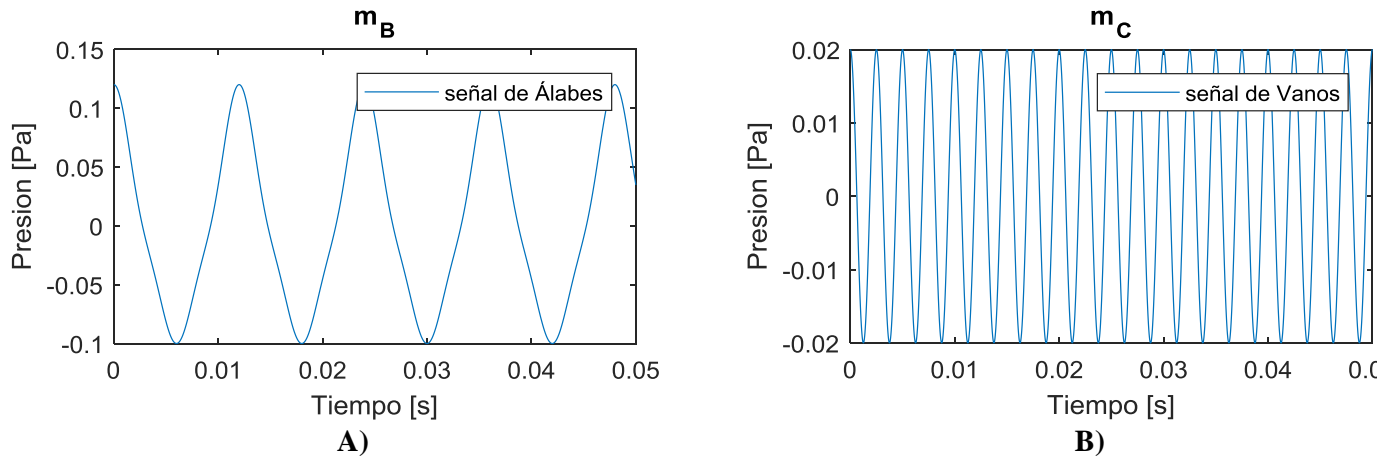


Fig. 1. Señales características sintetizadas de las máquinas. A) por paso de álabe. B) forma asociada al distribuidor

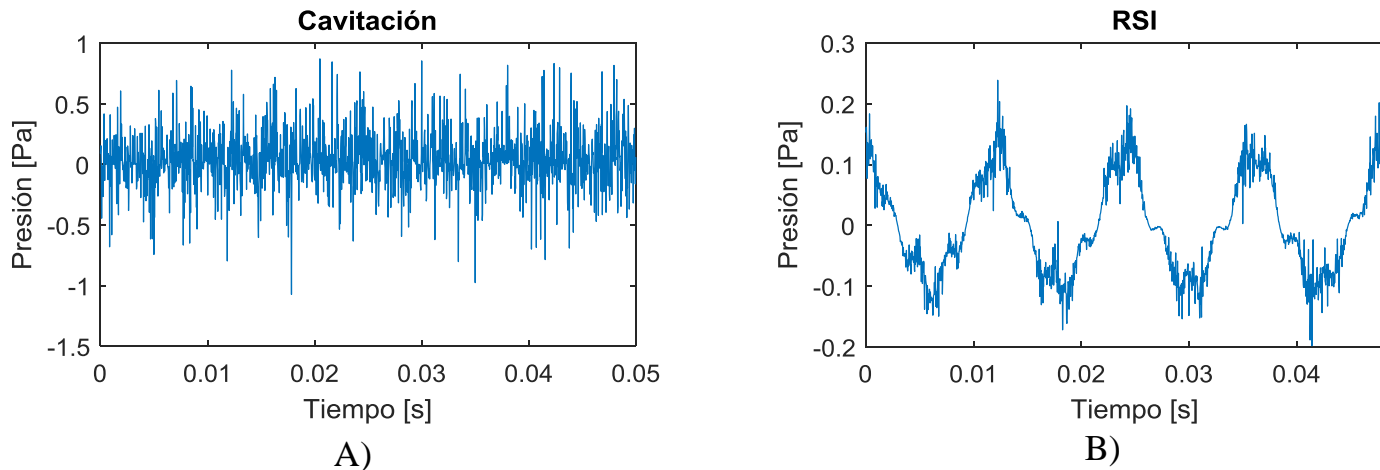
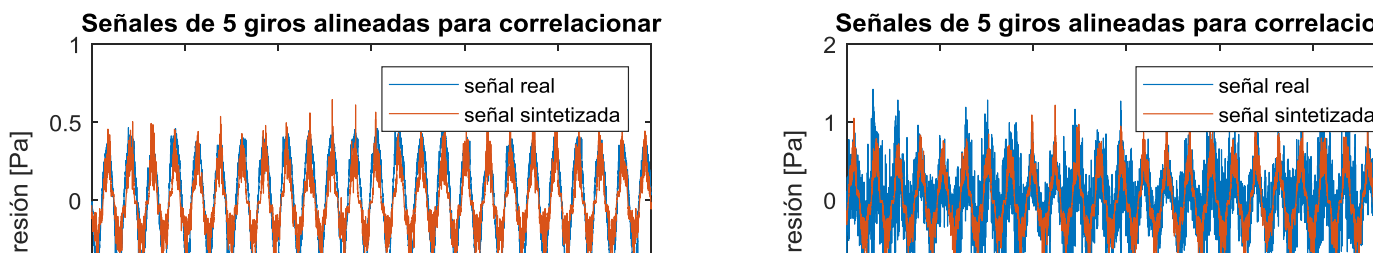


Fig. 2. Señales sintetizadas. A) de cavitación. B) interacción Rotor Estator (*rotor – stator interaction* - RSI)

3.1. Validación de señales del modelo

La validación del modelo consiste en cotejar las señales obtenidas con señales reales provenientes de un ensayo de modelo a escala y valorar la correlación entre las mismas. Para ello se tiene en cuenta, que la frecuencia de rotación sea la misma en ambos casos, que el modelo matemático sea configurado con igual número de álabes del rodete y de paletas del distribuidor, que la frecuencia de muestreo de las señales sean idénticas, que coincidan las ventanas de observación utilizadas para realizar las comparaciones, y que los parámetros estadísticos se correspondan. En este caso, al realizar las comparativas se obtienen en primer lugar los valores estadísticos de la señal real, y luego se utilizan como entradas en la señal sintetizada. Considerando un punto de operación con baja presencia de cavitación, las señales reales y sintetizadas toman la forma que se presenta en la Fig. 3.A) con un valor de correlación de 0,90; mientras que en la Fig. 3.B) se presenta una comparativa en una condición de mayor cavitación, obteniendo en este caso, un valor de correlación de 0,56.



variaciones estocásticas, la semejanza disminuye por la misma naturaleza de la variación, mantiene la forma de onda de la señal característica.

4. Conclusiones

Si bien el modelo matemático permite aproximar señales sintetizadas a las formas de observadas experimentalmente en un banco de ensayos de turbinas hidroeléctricas, aún resta ajustar el modelo a situaciones donde se observen valores elevados de dicho fenómeno. Las fuentes de divergencia podrían asociarse a la falta de inclusión de una transformación que se observa en la señal de presión debido a la trayectoria existente entre el origen de la onda de presión y la posición del sensor, y a la naturaleza del fenómeno propiamente dicho. Estas modificaciones están contempladas en la continuidad del trabajo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Laboratorio de Hidromecánica de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, y al Laboratorio de Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata, por facilitar los datos de ensayos de modelo que permiten realizar la validación y ajuste de las señales sintetizadas mediante el modelo estadístico.

Referencias

- [1] International Hydropower Association, «Hydropower Status Report. Sector Trends and Insights», International Hydropower Association, 2018.
- [2] IFC, «Hydroelectric Power. A Guide for Developers and Investors», International Finance Corporation. World Bank Group, 2010.
- [3] G. de P. Subgerencia de Planificación Estratégica, «Síntesis del Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina», Comisión Nacional de Energía Atómica, 2018.
- [4] Ministerio de Energía y Minería, «Escenarios Energéticos 2030», Presidencia de la Nación, Diciembre 2017.
- [5] W. Sandoval Erazo, *Capítulo 6: Conceptos Básicos de Centrales Hidroeléctricas*. 2018.
- [6] Arne Kjolje, *Hydropower in Norway*. Trondheim, 2001.
- [7] O. R. N. L. Mesa Associates, *Best Practice Catalog. Propeller/Kaplan Turbine*, vol. 1.0. 2004.
- [8] T. Rus, M. Dular, B. Širok, M. Hočevár, y I. Kern, «An Investigation of the Relationship Between Acoustic Emission, Vibration, Noise, and Cavitation Structures on a Kaplan Turbine», *J. Fluids Eng.*, vol. 129, n.º 9, pp. 1112-1122, 2007, doi: 10.1115/1.2754313.
- [9] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, y F. Avellan, «Detection of cavitation in hydraulic turbines», *J. Fluids Eng.*, vol. 128, n.º 4, pp. 0821-0827, 2006, doi: 10.1115/1.2754313.

- [14] J. Necker, C. Mende, y E. T. Zoghi, «Cavitation Monitoring in Hydraulic Turbines», 2013.
- [15] R. N. Schuster, G. D. Solonyezny, M. G. Krujoski, J. E. Kolodziej, F. E. Gonzales, G. A. Tarnowski, «Análisis espectral de vibraciones en turbinas hidroeléctricas», presentado en X Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, San Carlos de Bariloche, sep. 2013.
- [16] R. L. Marinho y F. A. P. Barúqui, «Cavitation Aggressiveness Estimation in Hydro Turbines Based on Cyclostationary Modeling», 2016.
- [17] K. Vokurka, «Time-Frequency Analysis of Cavitation Noise», 2001.