

MITIGACION DE LA CAVITACION DE EXTREMO DE ALABE MEDIANTE LA IMPLEMENTACION DE INYECCION DE AIRE EN UN MODELO A ESCALA REDUCIDA DE TURBINA KAPLAN

Rivetti, Arturo; Angulo, Mauricio; Lucino, Cecilia y Liscia, Sergio
UIDET Hidromecánica, Calle 47 N° 200, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
(+54) 0221-4236684. E-mail: arturorivetti@gmail.com.

Aclaración: Este trabajo fue presentado en el 27.º Simposio Internacional de Máquinas Hidráulicas y Sistemas del IAHR, Montreal, Canadá, septiembre del 2014.

Resumen.

Las Turbinas Kaplan que operan en condiciones de alta carga pueden estar sometidas a vibraciones excesivas, ruido y cavitación. En estos casos puede presentarse erosión por cavitación sobre el anillo de descarga asociada al desarrollo de cavitación de extremo de alabe. Este fenómeno involucra características de diseño tales como (1) sobre-apertura de los alabes del distribuidor; (2) perfil de los alabes del rodete; (3) el incremento del huelgo debido a la apertura del alabe; (4) la altura neta de aspiración; (5) el punto de operación; (6) el espesor del anillo de descarga, entre otras.

Con el objetivo de mitigar las vibraciones generadas por cavitación sobre el anillo de descarga, se diseñó e implementó la inyección presurizada de aire por encima del plano medio del rodete en el modelo físico a escala reducida. El ingreso de aire fue registrado mediante el uso de una cámara de alta velocidad para estudiar la trayectoria del mismo hasta el núcleo del vórtice de extremo de álabe. El post-procesamiento de las señales de aceleración muestra que el nivel de vibraciones y la amplitud de la frecuencia RSI (interacción rotor-estator) decrecen proporcionalmente con el incremento del caudal de aire inyectado, mientras que el rendimiento de la turbina disminuye. Estos resultados revelan el potencial de mitigación de la inyección de aire para prevenir el daño por cavitación y serán útiles para futuros ensayos a realizar en la turbina a escala prototipo, orientados a determinar el caudal de inyección óptimo y el tamaño y distribución de los puntos de inyección.

1. Introducción

Dependiendo de las condiciones de operación y diseño, el desarrollo de cavitación en turbinas Kaplan se puede localizar en diferentes zonas, principalmente en los alabes, el cubo y en el anillo de descarga [1]. La cavitación induce vibraciones y emisiones acústicas. Estudios en modelo físico han demostrado que los niveles de vibración y sonido están correlacionados con la disminución del número de Thoma (σ) y que dichos parámetros se encuentran modulados por la frecuencia del pasaje del álabe [2].

De los tipos de cavitación posibles, la cavitación de extremo de álabe es de particular interés debido a su potencial erosivo en los álabes, el anillo de descarga y el ingreso del tubo de aspiración. En condiciones de alta carga, este tipo de cavitación está directamente relacionado con el incremento de vibraciones y emisión de sonido.

Bajo esas condiciones, el flujo aguas abajo del distribuidor, al igual que el campo de presiones, pierden la uniformidad circunferencial. El campo de presiones no estacionario que gira con el rodete, interactúa con el flujo saliente del distribuidor generando una interacción conocida como rotor-estator (RSI) [3]. Este fenómeno, comúnmente observado en turbinas Francis y turbinas-bombas, puede aparecer en turbinas Kaplan cuando se genera un voladizo para grandes aperturas del distribuidor [4, 5]. El RSI en turbinas Kaplan es una explicación posible para el patrón de erosión por cavitación usualmente encontrado en el anillo de descarga, conformado por aureolas uniformemente distribuidas en la circunferencia en correspondencia con el número de alabes del distribuidor, como lo desarrollado por Nennemann [6] en base a resultados numéricos (CFD).

En este trabajo se propone la inyección presurizada de aire por encima del plano medio del rodete. El objetivo es la mitigación de las vibraciones generadas por la cavitación.

2. Materiales y métodos

2.1. Modelo físico a escala reducida

Los experimentos fueron llevados a cabo en la UIDET de Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata. El banco de ensayos consiste en un circuito cerrado en el cual se pueden ensayar modelos de turbinas Francis y Kaplan, Fig. 1. El ensayo fue realizado conforme a la norma IEC60193[7]. El error de cálculo en el rendimiento es menor al 0.24%.

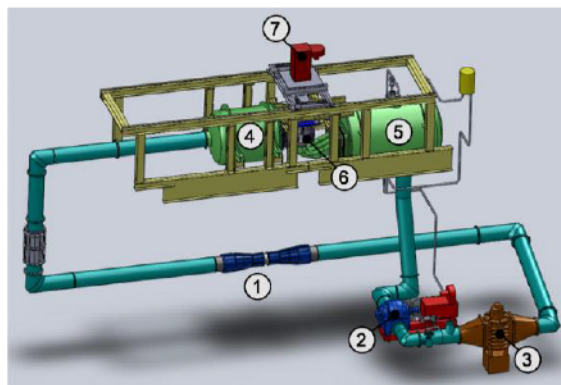


Figura 1. Banco universal de ensayos (1) Tubo Venturi; (2) Bomba de recirculación; (3) Válvula disipadora; (4) Tanque de alta presión; (5) Tanque de baja presión; (6) Modelo Kaplan; (7) Generador.

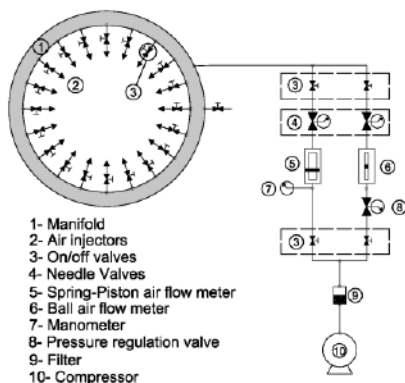
El modelo a escala corresponde a una turbina Kaplan con cinco alabes en el rodete y veinticuatro álabes en el distribuidor. El diámetro del modelo fue $D = 340 \text{ mm}$ con una velocidad específica $n_s = 614$. La velocidad de rotación $n = 1000 \text{ rpm}$, estableciendo un número de Reynolds $Re = 6.05 \times 10^6$, basado en la velocidad tangencial del álabe. El modelo fue colocado entre los tanques de alta y baja presión. El salto fue controlado modificando la velocidad de rotación de la bomba de recirculación. El tanque de baja presión está equipado con un sistema de control neumático que permite modificar la presión absoluta del circuito, posibilitando fijar un valor constante para el sigma de Thoma (σ), Eq. 1.

$$\sigma = \frac{\left(\frac{p_b - p_v}{\gamma}\right) + h_s}{H}$$

Eq.1 Donde p_b = presión en el tanque de baja, p_v = presión de vapor, γ = densidad del agua, h_s = altura de succión, H = salto neto. Dado que el ensayo fue realizado a salto constante, resulta evidente que el σ puede ser modificando variando solo la presión en el tanque de baja p_b .

2.2. Inyección de aire

El aire fue inyectado en el anillo de descarga sobre un plano horizontal por encima del plano medio del rodete a través de veinte perforaciones equiespaciadas de 3 mm de diámetro. Las mismas fueron vinculadas a un manifold de acero inoxidable a través de mangueras de igual longitud y diámetro, para garantizar el mismo coeficiente de descarga en cada punto de inyección. Para medir el caudal de aire se usaron dos tipos de caudalímetros con distinto rango ubicados entre el sistema de compresión y el manifold. El caudal de aire Q_a es ajustado mediante una válvula tipo aguja (Fig. 2a).



- 1- Manifold
- 2- Air Injectors
- 3- On/off valves
- 4- Needle Valves
- 5- Spring-Piston air flow meter
- 6- Ball air flow meter
- 7- Manometer
- 8- Pressure regulation valve
- 9- Filter
- 10- Compressor

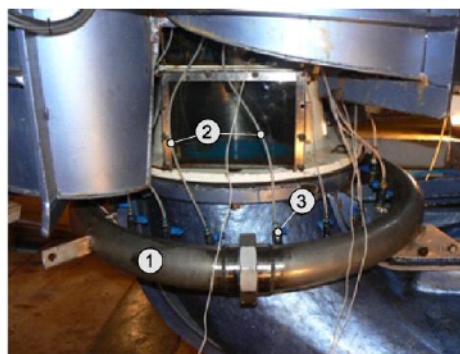


Figura 2. (a) Sistema de inyección de aire (b) Fotografía del sistema de inyección montado en el modelo Kaplan

2.3 Sistema de monitoreo

Aceleraciones: Se instalaron tres acelerómetros Endevco colson 2256A-100, con una frecuencia plana de respuesta en el rango de 0.1 Hz a 50 KHz (Fig. 3b). Los mismos fueron conectados a un amplificador Endevco.

Visualización en alta velocidad y sistema de iluminación: La trayectoria de aire y su interacción con la cavitación fue visualizado mediante una cámara de alta velocidad Photron FASTCAM SA4 conectada a un sistema de almacenamiento. La resolución adoptada fue de 1024x860 a 3600 fps para capturar un cuadro cada 1.66 grados de giro del rodete. Para la iluminación se utilizaron tres lámparas halógenas de tungsteno de 1000-watt (Fig. 3c).

Adquisición de datos: Las señales de aceleración fueron simultáneamente muestreadas a una frecuencia de 20 KHz durante 40 segundos para cada punto de ensayo con una resolución de 16 bit. El muestreo de las señales y el post-procesado fue realizado en software desarrollado en LABVIEW.

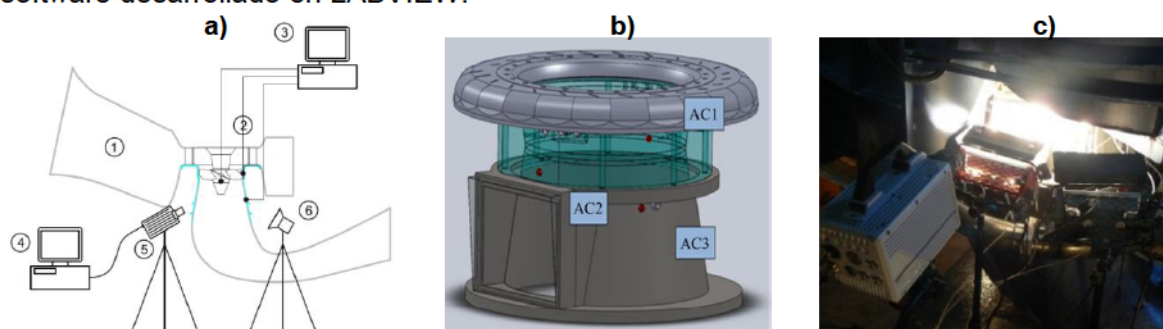


Figura 3. (a) Sistema de monitoreo: 1) Modelo Kaplan; 2) Instrumentación; 3) Adquisición de datos; 4) Almacenamiento de video; 5) Cámara de alta velocidad; 6) Lámparas de tungsteno; (b) Acelerómetros; (c) Cámara de alta velocidad y sistema de iluminación en el modelo.

2.4. Procedimiento de ensayo

El punto de operación seleccionado corresponde a un salto normal de la maquina en prototipo y alta carga, para una condición de combinatoria.

Para esta condición de funcionamiento, la cifra de velocidad fue de $n_{ED} = 0.55$ y la de caudal $Q_{ED} = 0.61$. El único parámetro que se modificó durante el ensayo fue el sigma de Thoma, modificando la presión en el tanque de baja.

Se realizaron ensayos de manera escalonada para distintos sigmas en un rango de $\sigma = 0.660$ a $\sigma = 2.260$. Para el escalón correspondiente a $\sigma = 0.946$, se inyectó aire en distintas cantidades alcanzando un caudal máximo de 2‰ expresado como fracción del caudal de agua del modelo Q . Para cada escalón, las señales de aceleración y las variables de operación del banco fueron adquiridas durante 40 seg. Se gravó un video para cada punto con la cámara de alta velocidad a 3600 fps durante un segundo para estudiar la trayectoria del aire y el desarrollo de la cavitación.

2.5. Procesamiento de datos

Desviación estándar de la aceleración: La magnitud de la desviación estándar st (Eq. 2) representa el nivel de vibraciones de los componentes estructurales del modelo. Las mismas son originadas como respuesta de las presiones dinámicas y fenómenos de cavitación debido al pasaje del rodete.

$$st = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde N = número de muestras, x_i = valores muestreados, \bar{x} = valor medio.

Transformada rápida de Fourier: la FFT standar fue utilizada para estudiar las señales en el dominio de las frecuencias.

Análisis de demodulación: Se obtuvo la envolvente de las aceleraciones mediante la transformada de Hilbert, aplicada a la señal original luego de aplicar un filtro pasa alto a 60 fn. Luego se realizó la FFT de la envolvente.

3. Resultados

3.1 Visualización del flujo a alta velocidad

3.1.1 Desarrollo de la cavitación

En la figura 4 se muestra una sucesión de cuadros tomados de los videos de alta velocidad para varios puntos de operación comprendidos entre un sigma de 2.290 (sin cavitación) a 0.660 (cavitación totalmente desarrollada). Hasta un sigma de $\sigma = 1.83$, el rodete se encuentra completamente libre de cavitación. Para $\sigma = 1.42$ se observa la aparición de cavitación de extremo de álabe, la cual crece a medida que el sigma disminuye. Para un sigma de $\sigma^* = 0.946$ se visualiza cavitación de cubo y para $\sigma = 0.770$ y menores, se observa un estado más generalizado, que incluye cavitación de borde de ataque y fuga, y cavitación de burbujas en el anillo de descarga.

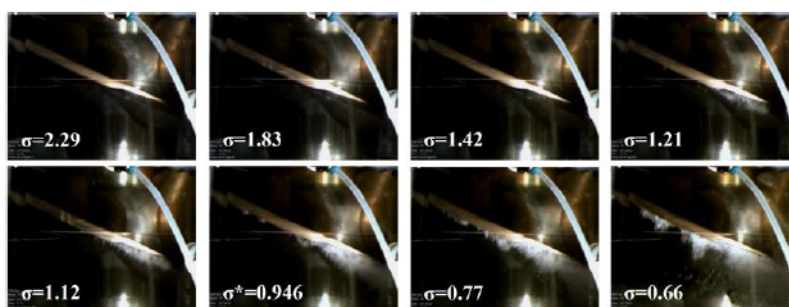


Figure 4. De izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo: imágenes del rodete para la misma posición y distintas condiciones de cavitación.

3.1.2 Trayectoria del aire

El aire inyectado es arrastrado por el agua (imagen 4) hasta que es interceptado por el pasaje del álabe (imagen 7). El aire es absorbido por el extremo de la cara de baja presión y se desliza siguiendo el contorno del mismo hasta alcanzar el volumen de cavitación generado por el vórtice de extremo de álabe (imagen 11).

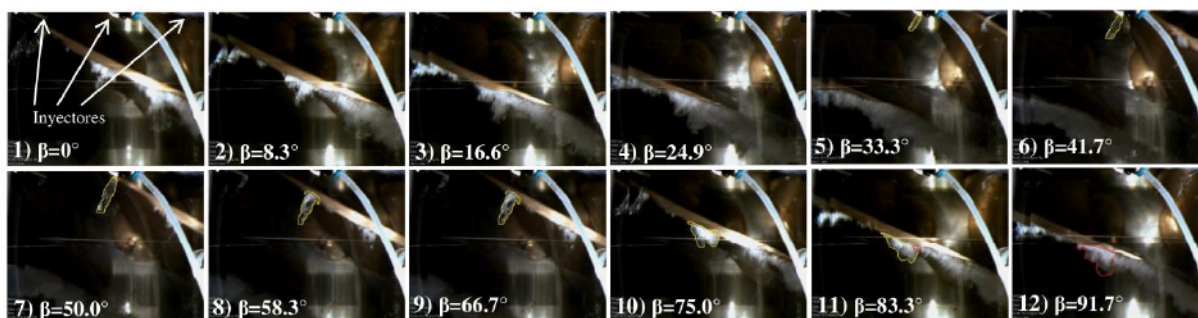


Figura 5. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: sucesión de cuadros de la cámara de alta velocidad cada 8.3° de rotación, cubriendo 1.3 veces un pasaje de álabe. El sigma de operación es de $\sigma^* = 0.946$. El aire está remarcado con una curva amarilla, mientras que la mezcla de cavitación y aire por una curva color roja.

3.2 Vibraciones

El nivel de vibraciones fue cuantificado con la desviación estándar de las señales de aceleración (Fig. 6^a). A medida que el sigma disminuye, las vibraciones crecen hasta alcanzar un pico local para valores de σ comprendidos entre 0.9 y 1.2 (dependiendo de qué acelerómetro es considerado). Luego de este pico hay una disminución hasta alcanzar el máximo nivel de vibraciones para un estado de máxima cavitación. Este comportamiento ya ha sido observado en un modelo Kaplan [2] a escala reducida.

La inyección de aire genera una atenuación del nivel de vibraciones, como se observa en la figura 6b para un sigma igual a $\sigma^* = 0.946$. El mínimo se alcanza para un caudal de aire de 0.8 ‰. Caudales mayores no generan ninguna disminución adicional de las vibraciones.

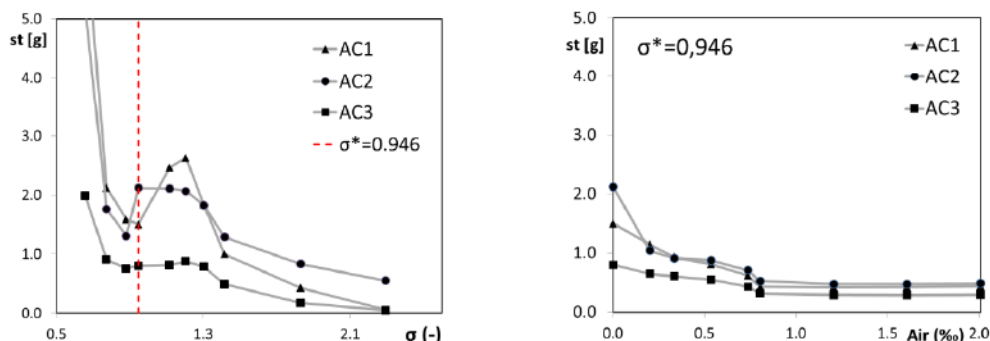


Figura 6. (a) Nivel de vibraciones en función de las condiciones de cavitación (b) Nivel de vibraciones en función del caudal de aire inyectado.

3.3 Rendimiento hidráulico

En la figura 7a se muestra el efecto de la cavitación en el rendimiento del modelo. Para el sigma $\sigma^* = 0.946$, para el cual el aire es inyectado, la caída es del 1.7 %. El efecto que produce la inyección de aire se aprecia en la figura 7b. La caída del rendimiento es menor al 2% para caudales menores a 0.8 ‰, y menor al 1% para caudales de 0.5 ‰. Cantidades mayores de aire afectan fuertemente el rendimiento, llegando a una caída de 6.8% para el máximo caudal de aire ensayado.

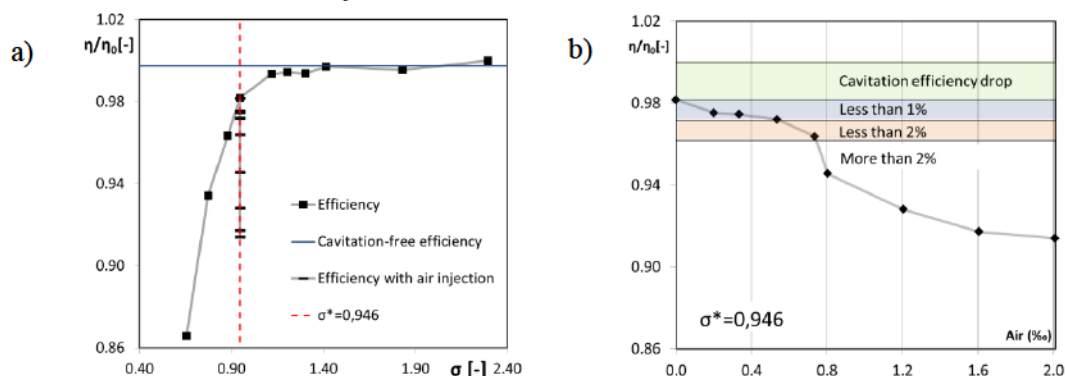


Figura7. (a) Rendimiento en función del sigma. (b) Caída del rendimiento debido a la inyección de aire.

3.4 Análisis en el dominio de la frecuencia.

Para la condición sin presencia de cavitación, las componentes de frecuencias se encuentran en un rango comprendido entre 5 y 50 fn ($\sigma = 2.290$). Las amplitudes son despreciables con respecto los puntos donde hay cavitación. Para $\sigma^* = 0.946$, la energía se desplaza a las altas frecuencias en un rango de 50 a 500 fn con un pico en 200 fn (Fig. 8a). Se aprecian dos componentes bien definidas para 25 fn y 50 fn , las cuales están asociadas al RSI. En la FFT de la envolvente (Fig. 8b), la frecuencia de pasaje de álabes 5 fn y 25 fn aparecen como las de mayor amplitud.

Con la inyección de aire la energía se desplaza para el lado de las bajas frecuencias, entre 10 a 100 fn (Fig. 9a). En la FFT de la envolvente aparece la componente 20 fn , asociada a la interacción del pasaje del alabe con el número de inyectores, Fig. 9b.

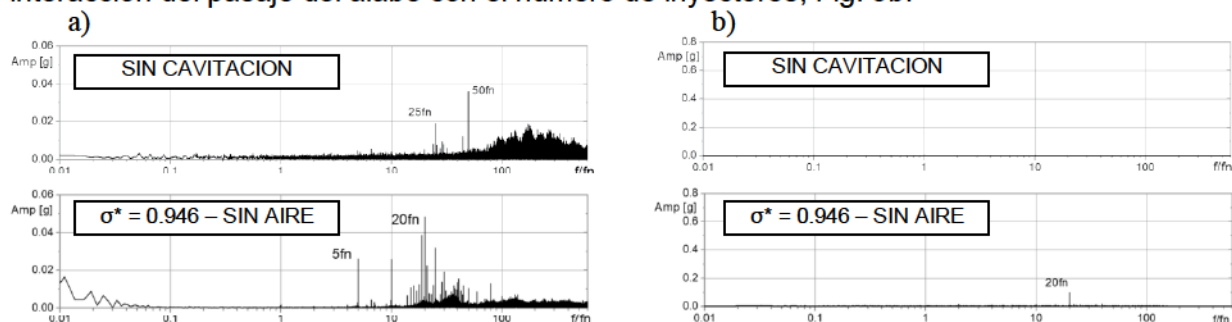


Figura 8. (a) FFT de las aceleraciones. (b) FFT de la envolvente de las aceleraciones

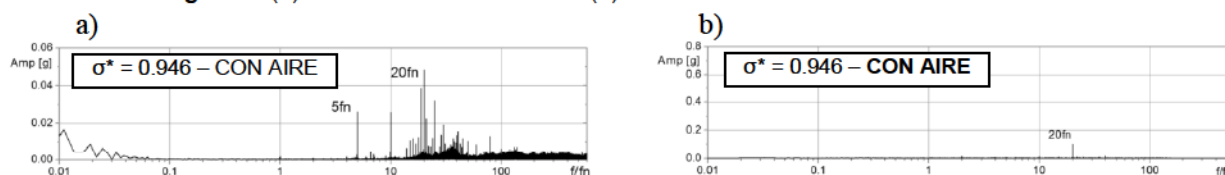


Figura 9. (a) FFT de las aceleraciones. (b) FFT de la envolvente de las aceleraciones

4. Conclusiones

Una serie de ensayos de cavitación se llevaron a cabo en un modelo físico de turbina Kaplan donde se implementó un sistema de inyección de aire en el anillo de descarga, con el objetivo de reducir las vibraciones generadas por la cavitación de extremo de álabe.

El ingreso del aire fue captado mediante filmaciones de alta velocidad para visualizar como es la trayectoria de las burbujas dentro del modelo, y su interacción con el desarrollo de la cavitación. El ingreso de aire no es continuo en cada punto de inyección, ya que se produce debido a la caída de presión generada por el pasaje del álabe. Cuando el borde de ataque pasa delante de un inyector, existe un impacto con el chorro de aire que ocurre veinte veces por cada álabe para cada giro del rodete. Este efecto se hace evidente en la envolvente de las aceleraciones donde la frecuencia $20 fn$ es dominante. La cavitación por vórtice de extremo de álabe es la principal causa del incremento de las vibraciones y su intensidad se refleja en las componentes de la envolvente iguales a $5 fn$ y $25 fn$ (RSI). Esta última frecuencia sugiere que el desarrollo del vórtice está afectado por el flujo no uniforme proveniente del distribuidor.

El nivel de vibraciones se redujo en un 50% para un caudal de aire de $Q_a = 0.4 \text{ ‰}$, a expensas de una caída en el rendimiento menor al 1%. Caudales de aire mayores a 0.8 ‰ no producen ninguna reducción adicional en el nivel de vibraciones causando caídas de rendimiento cada vez más grandes.

5. Referencias

- [1] Franc, JP, Avellan F, Kueny JL, 1995: La cavitation: mécanismes physiques et aspects industriels. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble PUG.
- [2] Rus T, Dular M, Sirok B, Hocevar M and Kern I, 2007: An investigation of the relationship between acoustic emission, vibration, noise and cavitation structures on a Kaplan turbine. ASME Transactions Vol 129.
- [3] Ruchonnet N, Nicolet C, Avellan F 2006: Hydroacoustic Modeling of Rotor Stator Interaction in Francis Pump-Turbine. IAHR Int. Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. Barcelona, Spain.
- [4] Rivetti A, Lucino C, Liscia S, Muguerza D, Avellan F 2012: Pressure Pulsation in Kaplan Turbines: Prototype – CFD Comparison. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Beijing, China.
- [5] Rivetti A, Lucino C, Liscia S, 2013: Guide Vane Influence on Pressure Fluctuation at the Discharge Ring in a Kaplan Turbine: Experimental Assessment. I IAHR Latin American Hydro Power and Systems Meeting, Campinas, Brazil.
- [6] Nennemann B and Vu T C, 2007: Kaplan turbine blade and discharge ring cavitation prediction using unsteady CFD. 2nd IAHR international meeting of the workgroup on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems. Timisoara, Romania.
- [7] IEC standards. Hydraulic turbines, storages pumps and pumps-turbines-model acceptance tests; IEC60193-1999.