

“WITNESS TEST” Y ENSAYOS ESPECIALES EN TURBINAS HIDRÁULICAS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL DISEÑO

Mauricio Angulo, Cecilia Lucino, Arturo Rivetti, Sergio Liscia

UIDET Hidromecánica - Facultad Ingeniería - UNLP.
Calle 47 N° 200, La Plata (CP1900), Argentina - mauriangulo@ing.unlp.edu.ar

Introducción

El cumplimiento de las garantías de rendimiento, cavitación, campo de operación y comportamiento hidrodinámico de las turbinas hidráulicas, especialmente las de gran potencia (mayor a 10 MW) se verifica previamente a la etapa de fabricación. Esto se realiza en modelos a escala montados en bancos de pruebas de turbinas hidráulicas, como el que opera la UIDET Hidromecánica de esta Facultad. Estos están especialmente equipados e instrumentados para cumplir con la normativa internacional en materia de estándares de calidad de medición. Los ensayos definitivos para aceptar o rechazar la turbina ofertada se denominan “Witness Test” en la bibliografía de la especialidad.

En este trabajo, en primer lugar, se describen los aspectos que tiene en cuenta la norma del IEC (International Electrotechnical Commission) para certificar el cumplimiento de los estándares de calidad del funcionamiento hidrodinámico de las turbinas. En segundo lugar, se describen los “Ensayos Especiales”, complementarios a los recomendados por la norma, que ha incorporado la UIDET Hidromecánica en sus procedimientos de ensayos y en su rol de inspección. Estos últimos se basan en la medición de la vibración a través de acelerómetros colocados en componentes estacionarios, cuya señal, adecuadamente procesada, resulta un indicador de la presencia y desarrollo de la cavitación. Se explica el tipo de procesamiento que permite anticipar la ocurrencia de fenómenos particulares, como es la interacción rotor-estator. Esta metodología fue contrastada y validada con mediciones en condiciones homólogas realizadas en modelo y prototipo (escala real).

El objetivo del trabajo es mostrar, a través de la presentación de resultados obtenidos en casos concretos - en los cuales los autores formaron parte del equipo de Inspección- el potencial predictivo que ofrecen la observación y medición en modelo físico a escala reducida en las turbomáquinas hidráulicas y su versatilidad como herramienta que permite explorar diferentes condiciones de operación.

Ensayos normalizados

La norma IEC N° 60193 establece las condiciones, requerimiento y procedimientos necesarios para para realización de ensayos de aceptación de turbomáquinas hidráulicas en modelos físicos a escala, estos ensayos son denominados comúnmente ensayos presenciados o “witness test”. La normativa permite definir las condiciones en que los ensayos se realizarán atendiendo a que existen partes interesadas diseñador/fabricante por un lado y comprador/cliente por el otro. Dichos ensayos pueden realizarse en un banco de ensayos propio del diseñador y en otras circunstancias pueden realizarse sobre un banco neutral de un tercero como es el caso del banco de ensayos de la Facultad de Ingeniería-UNLP.

En la Tabla 1, se describen los ensayos, si bien la norma no establece una categorización de los ensayos a realizar, los mismos pueden ser divididos ensayos básicos (1-3) y adicionales (4-9).

Tabla 1: Ensayos normalizados según IEC 60193 Ed. 1999. En la columna de resultados se indican entre paréntesis los ejes X-Y o X-Y-Z (cuando se trata de isolíneas) que más comúnmente se utilizan. El subíndice “m” indica modelo físico y “p” indica prototipo es decir la escala 1:1. Las turbomáquinas se abrevian como “TMH”, las turbinas tipo Kaplan se indican como “TK” y las Francis “TF”.

	Ensayo	Objetivo	Resultados ¹
1	Rendimiento	Conocer la eficiencia con que la TMH transforma la energía hidráulica en mecánica, para todo el campo de explotación y en puntos específicos.	Diagrama colinar ($Q_{11}-n_{11}-\eta_{hM}^*$) y de explotación ($H_P-Q_P-\eta_{hP}$, $H_P-P_{mP}-\eta_{hP}$). Máxima eficiencia de la TMH, máxima eficiencia dentro del campo de explotación y rendimiento ponderado por la frecuencia de operación.
2	Cavitación	Detectar el inicio de la cavitación, las condiciones de operación real de la TMH y la rampa de caída del rendimiento para todo el campo de explotación.	Curvas sigma ($\sigma-\eta_M$) para un rango de H_P-Q_P o H_P-P_{mP} . Se toman fotografías y se realizan esquemas a mano alzada. Adicionalmente se grafican curvas ($P_{11}-\sigma$ y $Q_{11}-\sigma$)
3	Embalamiento	Determinar la velocidad que alcanza la TMH cuando no entrega Torque en el eje, para diferentes aperturas del distribuidor y álabes (en TK), evaluando con y sin influencia de sigma.	Curvas de embalamiento ($Q_{11}-n_{11}$ y Q_p-n_R) para sigma cte. y ($\sigma-n_{11}$ y $n_R-\sigma$) para sigma variable. Para las TK también se realizan las curvas para diferente apertura de los álabes en condición on-cam y off-cam.
4	Presiones fluctuantes	Cuantificar el nivel de fluctuación de la presión en los siguientes órganos de una TMH: cámara espiral, tapa de turbina, zona entre vanos de predistribuidor y distribuidor y en particular dentro del tubo de aspiración. Se evalúa con y sin influencia de sigma.	Gráficos ($\Delta H/H-Q_{11}$ y $\Delta H/H-P_P$) para sigma cte. y ($\Delta H/H-\sigma$) para diferentes H_P . También gráficos Presión-tiempo y espectro amplitud de fluctuación-frecuencia para cada punto de medición.
5	Fluctuación del Torque	Cuantificar el nivel de fluctuación del torque y potencia en el eje inducido por vórtices dentro de la masa del fluido.	Gráficos Torque-tiempo y espectro de amplitud de fluctuación de torque.
6	Empuje axial y radial	Determinar el empuje axial y radial en el eje de la TMH con miras al cálculo mecánico.	Curvas de empuje para diferentes saltos en condiciones normales y en embalamiento. ($Q_{11}-F_M$, Q_P-F_P y $P_{mP}-F_P$) donde F puede ser axial o radial.
7	Torque en paletas de distribuidor y álabes	Verificar la tendencia al cierre del distribuidor, determinar los torques máximos en paletas y álabes bajo diferentes hipótesis de rotura.	Curvas α -coef T para diferentes H_P y β (turbinas Kaplan). Con paletas sincronizadas y no sincronizadas.
8	Winter-Kennedy	Proveer de una ley que vincule el caudal que circula dentro de la TMH en función de la diferencia de presión medida en la cámara espiral, con miras a realizar ensayos tipo índice en el prototipo.	Curvas ($Q_M-\Delta P_{WKM}$ y $Q_P-\Delta P_{WKP}$) para diferentes secciones de medición en la cámara espiral.
9	Aireación	En casos particulares, evaluar la efectividad de la inyección o admisión de aire para mitigar fenómenos de origen hidráulico propios de cada diseño de TMH.	Gráficos de pulsaciones de presión en diferentes localizaciones de las TMH expresados como $Q_a[\%]-\Delta H/H$.

¹ La nomenclatura utilizada para todas las variables que conforman los gráficos sigue la utilizada en la norma IEC 60193 [3]

Ensayos especiales - Metodología

Los ensayos especiales fueron diseñados para acompañar en forma simultánea un ensayo standard de cavitación en particular de turbinas tipo Kaplan, donde los fenómenos de cavitación de extremo de álabe e interacción rotor-estator (IRE) resultan relevantes. A continuación, se establecerá su procedimiento y los requerimientos mínimos para la medición y procesamiento de las variables dinámicas, aceleración, presiones fluctuantes y emisión acústica. El método pretende cuantificar y comparar diferentes diseños cuantificando las diferencias de forma objetiva reduciendo así el apoyo en la comparación visual de esquemas a mano alzada, fotografías y videos que requieren de especialistas con mayor experiencia y que aun así no están exentos de subjetividad.

Durante los ensayos de cavitación se registran mínimamente las siguientes variables: Apertura de los alabes del rodete (B_o), Apertura del distribuidor (A_o), velocidad de rotación (n), Salto útil (H_u), Caudal (Q), Potencia mecánica (P_{mec}), Sigma de Thoma (σ), Temperatura del agua (T_a) y Oxígeno disuelto en el agua (OD). Los ensayos especiales adicionan la medición de variables dinámicas: *vibraciones*, *emisión acústica* y *presiones fluctuantes* en el inicio del tubo de aspiración. La medición de las variables de estado se realizará de acuerdo con las recomendaciones de la norma IEC N° 60193 y las variables dinámicas se procesarán según se describe más adelante.

Instrumentación requerida: La instrumentación consiste en tres acelerómetros (AC1, AC2 y AC3), dos sensores de presión (SP1 y SP2) y un hidrófono (HID). La ubicación axial y radial de los mismos se indica en la Figura 1. El ángulo α formado entre la posición del AC1 y el eje longitudinal de la turbina es arbitrario, dependiendo solo de la comodidad para su instalación. El AC2 debe estar a 90° del AC1 en cualquiera de sus direcciones en el sentido tangencial. El AC3 puede ser ubicado en cualquier dirección radial sobre el plano axial correspondiente. Los sensores SP1 y SP2 se ubican aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

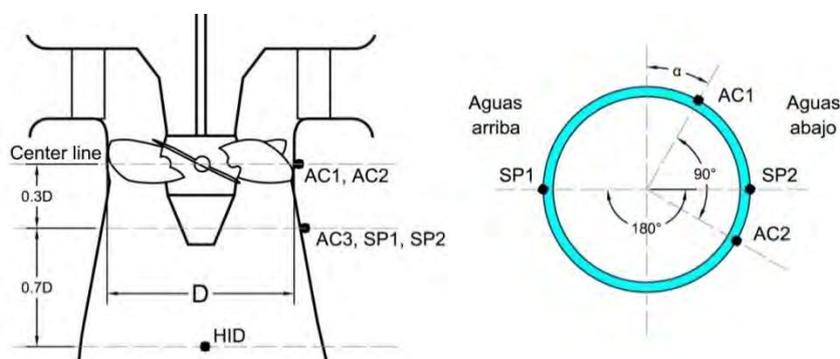


Figura 1.- Instrumentación. Izq: Posición axial de los sensores.
Der: Posición tangencial de los sensores.

Acelerómetros: Se toma como modelo de referencia el acelerómetro ENDEVCO Isotron 7259B-50, aunque pueden utilizarse cualquier modelo y marca que asegure una respuesta plana entre frecuencias de 1 a 30 KHz, una frecuencia de resonancia mayor a 25 KHz, y un rango mayor a ± 10 g. El modelo propuesto tiene una amplitud de respuesta de 1 a 30 kHz, rango ± 50 g y frecuencia de resonancia 90 kHz, sus dimensiones son 9.5 mm de diámetro y 11.7 mm de altura.

Hidrófono: El modelo de referencia es un hidrófono Bruel & Kjaer 8103-D-200 preparado para ensayos de modelos físico. De igual forma podrán utilizarse otros equipos que aseguren una respuesta plana entre frecuencias de 1 a 30 KHz, una frecuencia de resonancia mayor a 25 KHz. Para la instalación del hidrófono en el tubo de aspiración la sonda deberá estar completamente embebida en agua. El modelo indicado tiene una amplitud de respuesta de 1 a 200 KHz y frecuencia de resonancia 25 KHz, sus dimensiones son 9.5 mm de diámetro y 16 mm de largo.

Sensores de presión: El modelo de referencia los sensores de presión es el Kistler 701-A. Al igual que los anteriores sensores de utilizar otras marcas y modelos deberán tener una respuesta plana entre frecuencias de 1 a 30 KHz, una frecuencia de resonancia mayor a 25 KHz, además deberá instalarse empotrado al ras de la superficie mojada (flush mounting), sus dimensiones: 9.5 mm de diámetro y 22 mm de longitud.

Adquisición y procesamiento de datos: Los datos serán adquiridos durante 40 s para cada punto de ensayo, con una frecuencia de muestreo no menor de 35 KHz y con una adecuada aplicación de filtros, tales que no alteren los fenómenos hidráulicos involucrados. En cada punto de ensayo se aplica un procesamiento básico de señales para estimar por un lado, la magnitud de la cavitación de extremo de álabe y por otro lado su interacción con las paletas del distribuidor.

Desviación estándar: Se calcula la magnitud de la desviación estándar sobre las diferentes señales adquiridas en el dominio del tiempo.

$$sd = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Amplitud pico a pico (97%): Se considera como amplitud de la pulsación de presión al percentil 97% de las amplitudes. Este cálculo se obtiene como la resta entre el percentil 98.5% y 1.5% del registro completo de la señal de presión.

$$Amp_{97\%} = y(t)_{98.5\%} - y(t)_{1.5\%}$$

Amplitud RSI: Es la amplitud correspondiente a la frecuencia de interacción entre el flujo proveniente del distribuidor y la cavitación de extremo de álabe, que puede anticiparse teniendo en cuenta parámetros geométricos y la velocidad de giro del rotor [5, 6].

Desarrollo del ensayo: Durante los ensayos de cavitación para cada curva de ensayo de cavitación, se registran de manera simultánea las variables dinámicas y las variables de estado. El ensayo estará compuesto por una cantidad suficiente de puntos tales que determinen en detalle la forma de la curva, comenzando con un valor de sigma suficientemente alto, el cual será tomado como referencia punto denominado "sigma alto". Luego se prosigue descendiendo el valor de sigma pasando por: Sigma Planta, Sigma Incipiente, Sigma Cero y Sigma 1% donde deben ser adquiridos y visualizados en particular.

Se considera el punto de ensayo como Sigma Incipiente, a cuando se presente en el primer álabe o simultáneamente en varios álabes, el fenómeno incipiente de cavitación. Es necesario que previo al ensayo se numeren los álabes y se midan los huelgos (gap) entre cada álabe del rodete y el anillo de descarga en diferentes posiciones.

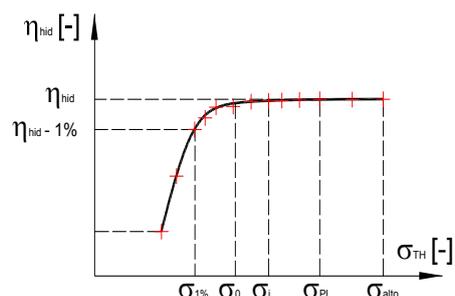


Figura 2: Curva de sigma representativa de un ensayo de cavitación. En rojo se indican los puntos de registro de variables dinámicas en simultáneo.

Resultados: Complementariamente a las curvas de sigma, se trazarán (como mínimo) las curvas pertenecientes a: Desviación estándar de la aceleración AC1, AC2 y AC3; Amplitud RSI del hidrófono y Amplitud 97% de la señal de presión SP1 y SP2. Es conveniente que las variables se muestren en un mismo gráfico adimensionalizadas con respecto al máximo valor registrado correspondiente para salto nominal y potencia máxima (Figura 3).

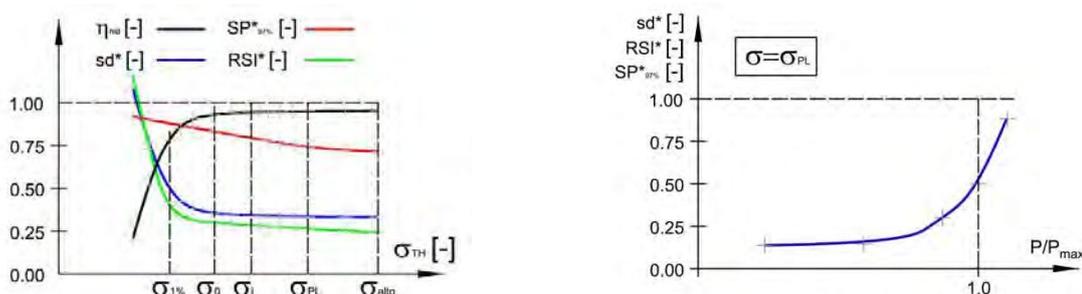


Figura 3: Izq. Ejemplo de presentación de las variables procesadas en función de sigma. Der. Variables dinámicas procesadas en función de la potencia, para un salto constante.

Como resultados del ensayo de cavitación se realizan esquemas mostrando el desarrollo de cavitación sobre los álabes, se toman fotografías y videos de un giro completo en los puntos característicos indicados. A partir de los ensayos cavitación, se analizan las amplitudes relativas de las variables dinámicas y se grafican de manera conjunta en función de la potencia.

Caso de estudio

A modo de ejemplo se menciona una experiencia en la que intervino la UIDET Hidromecánica, en donde se requería evaluar el funcionamiento de tres nuevos diseños proyectados por diferentes fabricantes para reemplazar el actual diseño de un rodete existente tipo Kaplan. Los diseños solo difieren en la forma de los álabes; el resto de los parámetros de diseño, como diámetro del rodete, diámetro del cubo del rodete, posición del plano medio del rodete, salto de diseño, caudal de diseño y velocidad de giro son iguales para todos.

En particular se detallan los resultados del procesamiento para un mismo punto de operación [Figura 4]. Se puede apreciar que a medida que el valor de sigma disminuye el desvío estándar se mantiene estable hasta que a partir de un punto se detecta un cambio de pendiente. Este cambio de pendiente es mas abrupto en el diseño 2, luego el 1 y el diseño original. También se observa que en el diseño original el tramo estable es muy breve y luego debajo de sigma 1.5 las vibraciones aumentan gradualmente. En la visualización sobre modelo físico se observa la aparición de la cavitación de extremo de álabe, mientras que para el resto de los diseños aún no se detecta. El incremento del nivel de vibraciones debido a la cavitación de extremo de álabe se da primero en el diseño 1, luego en el 2 y por último en el 3, en donde no se percibe un

aumento abrupto a diferencia del resto. En relación con el funcionamiento a sigma planta, que es aquella condición en donde la turbina funcionará en la central, se observa que el diseño 1 y 2 poseen un mismo nivel de vibraciones, el 3 es levemente inferior, mientras que para el diseño original el nivel de vibraciones es 4 veces superior. Por tanto, desde el punto de vista del desarrollo de cavitación, resulta más aceptable el diseño 3. Esta afirmación también pudo ser verificada mediante la observación de esquemas y registros fotográficos. Si se observan las curvas de sigma para los diferentes diseños, el diseño 3 tiene el mayor rendimiento hidráulico y el sigma inicio de caída del rendimiento más bajo en concordancia con lo anticipado por los ensayos especiales.

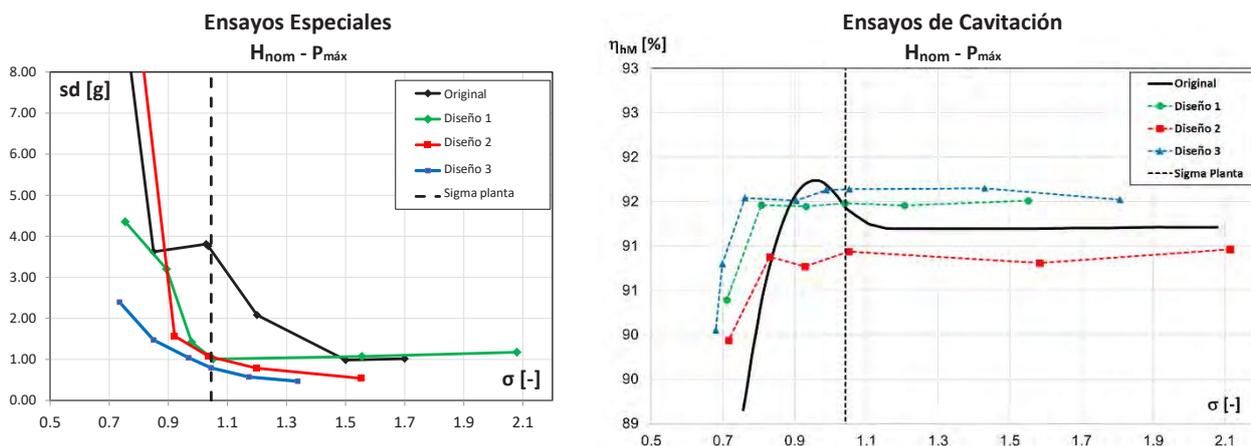


Figura 4: Izq: Ejemplo de presentación de las variables procesadas en función de sigma. Der: Curvas sigma para todos los diseños.

Conclusiones

Se concluye que la técnica incorporada por la UIDET Hidromecánica para evaluar el comportamiento dinámico de las turbinas hidráulicas resulta ser de mucha utilidad con fines predictivos en modelo físico a escala y puede utilizarse como un complemento a los ensayos presenciados, Witness Test, que están comprendidos y definidos en la normativa de referencia.

Bibliografía

- [1] Dörfler, P. Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydraulic Machinery. Springer. pp 140,141.
- [2] Jean P. Franc et al.: La Cavitation, mecanismes physiques et aspects industriels. Editorial Press Universitaire Grenoble, France, 1995.
- [3] IEC 60193. "Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests". International Electrotechnical Committee, Ed 2º 1999-11.
- [4] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, and M. Coussirat, "Detection of cavitation in hydraulic turbines," Mech. Syst. Signal Process., vol. 20, no. 4, pp. 983–1007, 2006.
- [5] Ruchonnet N, Nicolette C, Avellan F: "Hydroacoustic modeling of rotor stator interaction in francis pump-turbine". IAHR Int. Meeting of Working Group on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems. Barcelona, 28-30 Junio, 2006.
- [6] Franke G, Fisher R.: "On pressure mode shapes arising from rotor/stator interactions". Voith Siemens Hydro Power Generation Inc., York, Pennsylvania. Sound and Vibration/March 2005.