
ENSAYOS EN MODELO REDUCIDO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA TURBINA TIPO FRANCIS – PROYECTO BAKUN

D.A. RODRIGUEZ*
IMPSA Hydro
Argentina

J.C. CACCIAVILLANI
IMPSA Hydro
Argentina

B. BELING
IMPSA Hydro
Argentina

Resumen .El aprovechamiento hidroeléctrico Bakun, ubicado sobre el río Balui en Sarawak, Malasia con una capacidad instalada de 2800 MW está compuesto por 8 unidades generadoras tipo Francis de 350MW y Salto nominal de 172,4m. A través de una licitación internacional, IMPSA obtuvo el contrato de provisión de 4 unidades de generación completas, cuyo diseño hidráulico fue desarrollado en el Centro de Investigaciones Tecnológicas de IMPSA. El proceso de desarrollo incluye: diseño hidráulico, simulación numérica, diseño mecánico del modelo, ensayos hidráulicos preliminares y ensayos finales presenciados por el Cliente (ensayos de aceptación). En este trabajo se presentan los diferentes tipos de ensayos que se ejecutaron sobre el Modelo a escala reducida, instalado en el Banco Universal de Alta Caída, mediante los cuales se verificaron las garantías contractuales de comportamiento hidráulico.

Palabras clave: turbinas tipo Francis – ensayos hidráulicos – modelo a escala reducida – banco universal de alta caída

1 INTRODUCCIÓN

Los datos técnicos principales de la turbina Bakun son:

Turbina tipo Francis eje vertical
Capacidad: 4 x 350 MW
Salto Nominal: 172.4m
Velocidad de rotación: 166.7 rpm

El desarrollo de las turbinas Francis del proyecto Bakun realizado en el Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT), comienza con el diseño hidráulico de todos sus componentes, (cámara espiral, rodete y tubo de aspiración) sigue luego con el proceso de optimización mediante simulación numérica (CFD), continúa con la etapa de simulación física mediante pruebas en Banco de Ensayos y concluye con la validación final del diseño, los cuales configuran todo un proceso de desarrollo que culmina en las pruebas presenciadas por el Cliente conjuntamente con expertos internacionales “Witness Test” de verificación de garantías contractuales.

El Modelo hidráulico en escala reducida fue ensayado siguiendo el proceso de verificación dado por la Norma IEC 60193 “Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests” [1] comenzando con las calibraciones de los transductores de medición de caudal, presión y torque, siguiendo con los distintos ensayos programados y culminando con el control dimensional de las partes componentes del Modelo.

* IMPSA-Hydro, Centro de Investigaciones Tecnológicas. Rodriguez Peña 2451, M5503AHY, Godoy Cruz, Mendoza, Argentina. www.impsa.com danielamancio.rodriguez@impsa.com

Entre las principales pruebas realizadas, en el presente trabajo se detallan:

- Ensayo de Eficiencia
- Ensayo de Cavitación
- Ensayos de fluctuaciones de presión

2 GENERALIDADES

2.1 Descripción de la Plataforma de Ensayos

El Laboratorio Hidráulico perteneciente al CIT cuenta con dos Bancos de Ensayos aptos para pruebas de Modelos correspondientes con todo tipo de turbo-máquinas hidráulicas.

El reservorio principal (volumen: 1200 m³), el tanque de calibración de caudal (volumen: 100 m³) y el sistema de bombeo conjuntamente con los circuitos principales de ensayos configuran los diversos modos de operación y calibración de los Bancos de ensayos de turbo-máquinas hidráulicas. Adicionalmente, el circuito hidráulico configurado en modo “Circuito Abierto”, ello es, retornando el flujo de agua a la cisterna principal, permite ensayar diversos componentes hidromecánicos (válvulas, compuertas, obras de toma, bifurcadores, etc.).

En particular, el Modelo Bakun fue ensayado en el Banco universal de alta caída, el cual posee un sistema de bombeo compuesto por dos bombas con posibilidad de conexión paralela o serie y un sistema de generación (Motor-generator) con velocidad variable y potencia máxima (P=500 kW).

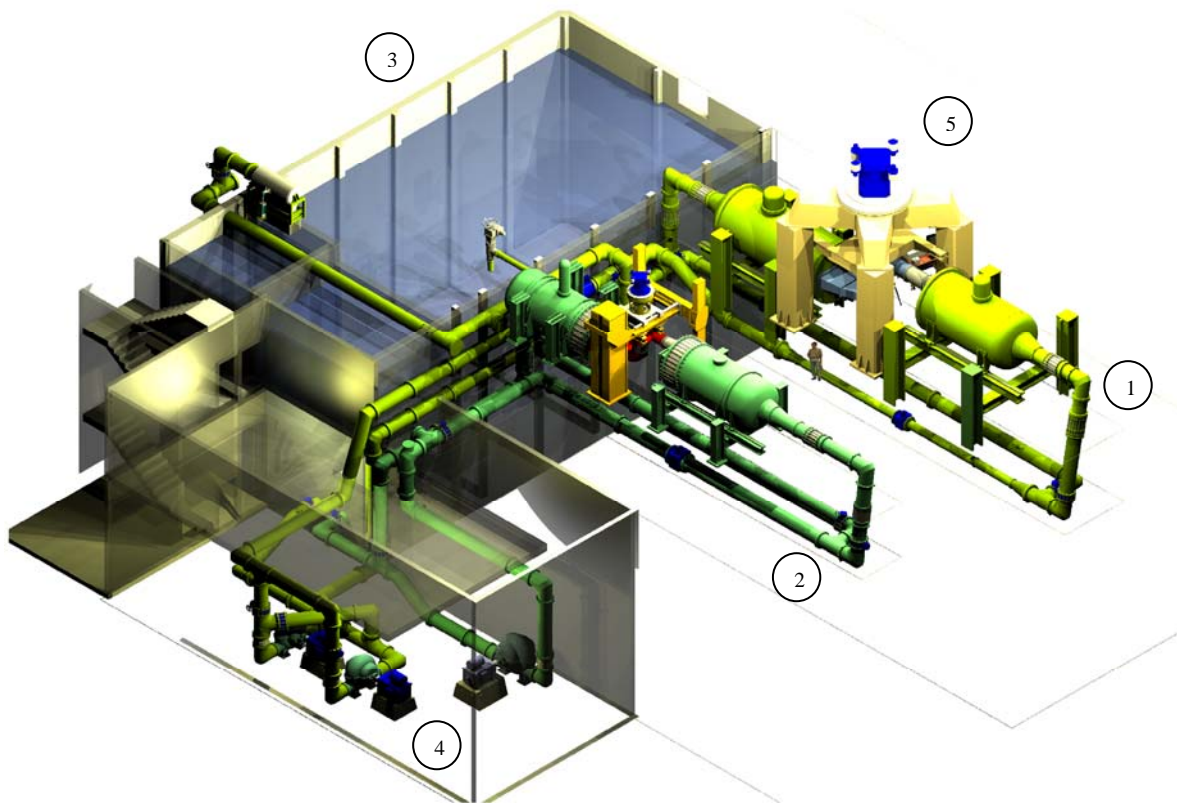


Fig. 1. Vista general de las instalaciones del Laboratorio Hidráulico. (1) Banco Universal de alta caída. (2) Banco de baja caída. (3) Cisterna principal. (4) Sistema de bombeo independiente para cada plataforma. (5) Pórtico principal- plataforma porta Modelo

Las distintas condiciones hidráulicas de Ensayo del Modelo, las cuales cubren todo el rango de operación en Prototipo, son alcanzadas mediante la operación del banco en modo “Circuito cerrado” por medio del control de velocidad del sistema de bombeo y velocidad de rotación de la turbina.

Otra variable importante de ensayo es la presión absoluta generada en la descarga del tubo difusor. La misma es controlada mediante bombas de vacío conectadas al tanque de baja presión, las cuales permiten obtener los distintos valores del Número de Thoma “Sigma” necesario durante las pruebas de Cavitación.

Todas estas operaciones son comandadas desde las salas de control de cada banco, donde se encuentran los equipos de acondicionamiento de señales y adquisición provenientes de los diferentes transductores de medición localizados en el circuito hidráulico, pórtico principal y Modelo reducido.

2.2 Características del Modelo

El Modelo construido en escala reducida representa geoméricamente y dinámicamente las características del Prototipo.

Está compuesto por la cámara espiral, pre-distribuidor, distribuidor, rodete y tubo difusor. El movimiento de apertura y cierre del distribuidor se realiza por medio del sistema de palancas y anillo de comando motorizado y controlado desde la sala de ensayos. La visualización de los diversos fenómenos hidráulicos se realiza a través del cono difusor de acrílico localizado inmediatamente debajo del rodete.

Dentro del programa de desarrollo específico se diseñaron, simularon por CFD [2] y ensayaron diferentes variantes de rodetes hasta obtener las características necesarias de “performance” que cumplen con las garantías contractuales del proyecto Bakun.



Fig. 2. Modelo Bakun montado en el Banco Universal de Ensayos de alta caída

2.3 Características principales de las Pruebas

La eficiencia hidráulica de la turbina constituye uno de los valores fundamentales que se deben garantizar, usualmente verificada por medio de ensayos en Modelo reducido.

La eficiencia hidráulica esta dada por:

$$\eta = \frac{P}{H * Q * \rho * g}$$

Siendo: H = salto, Q = caudal, P = potencia, ρ = densidad y g= gravedad.

Los valores de H, Q y P son adquiridos a través de transductores electrónicos sujetos a calibraciones antes y después de los ensayos por medio de métodos primarios, es decir basados en mediciones de Longitud, Masa y Tiempo con patrones trazables.

La incertidumbre total (error sistemático + aleatorio) alcanzada durante las pruebas fue $e_{Total}=\pm 0.25\%$

En el diagrama de colina de la Figura 3 se observa el comportamiento general de la turbina, donde se representan por curvas de nivel los valores de eficiencia respecto a sus ejes coordenados:

$$n_{11} = \frac{n_M * D_M}{\sqrt{H_M}} \quad Q_{11} = \frac{Q_M}{D_M^2 \sqrt{H_M}}$$

Los valores unitarios de velocidad (n_{11}) y caudal (Q_{11}) están deducidos a partir de las condiciones de similitud geométrica y cinemática.

Con respecto a la similitud dinámica, el escurrimiento a presión dentro del Modelo es un proceso dependiente de la viscosidad, donde las fuerzas de fricción son preponderantes y los mecanismos de disipación de energía son a través de fricción y pérdidas localizadas. La relación entre las fuerzas viscosas y las de inercia se expresan a través del número adimensional de Reynolds

$$Re_u = \frac{D * u}{\nu}$$

Siendo: D = diámetro del rotor, u = velocidad periférica y ν = viscosidad cinemática

En nuestro caso, el ensayo se ejecutó a valores de Re variables entre $4.5 * 10^6$ y $7.5 * 10^6$, luego aplicando la fórmula de escalamiento dada por la norma IEC 60193 se obtiene el rendimiento hidráulico en Prototipo.

Otro parámetro adimensional utilizado durante los ensayos de Cavitación y fluctuaciones de presión es el Número de Thoma "Sigma"

$$\sigma = \frac{H_b - H_s - H_v}{H}$$

donde: $H_b - H_s - H_v = \text{NPSH}$ representa la altura neta positiva de succión

3 EFICIENCIA HIDRÁULICA

3.1 Ensayo de Eficiencia en Modelo

El comportamiento global de la turbina Modelo está caracterizado por su diagrama colinar de eficiencia. Ello significa que las pérdidas hidráulicas producidas en distintos regímenes de caudal y salto y desarrolladas desde la entrada a la cámara espiral hasta la salida en el tubo difusor, se manifiestan en distintas proporciones logrando un diagrama con forma de colina con su eficiencia máxima en la cúspide.

Dicho punto corresponde con la zona de menores pérdidas, donde los efectos de separación de flujo por perfil y circulación a la salida del rodete son mínimos.

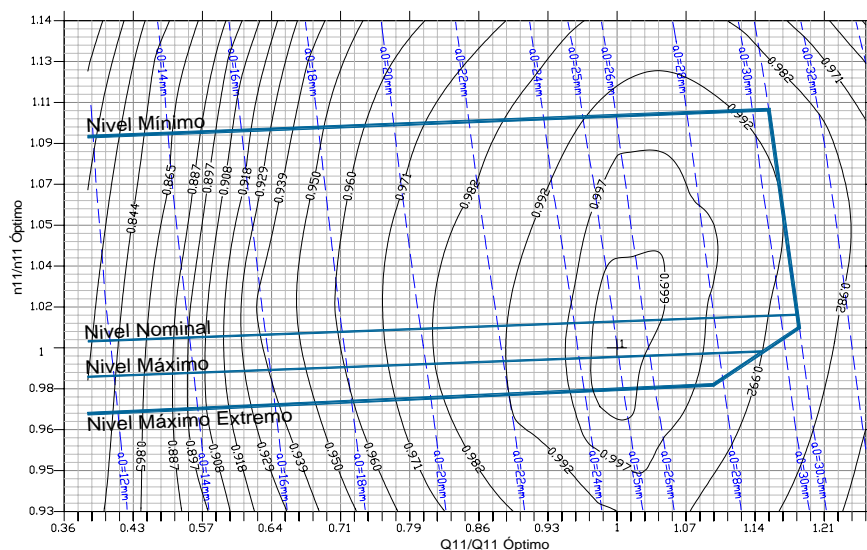


Fig. 3. Diagrama Colinar del Modelo Bakun: representado por las iso-curvas de eficiencia relativa y aperturas del distribuidor en función de los números unitarios de velocidad n_{11} y caudal Q_{11} relativos

3.2 Eficiencia media ponderada escalada a prototipo

Basados en las eficiencias medidas en Modelo, se realiza el escalamiento a las condiciones del Prototipo y se calcula la eficiencia media ponderada según la matriz de ponderación determinada en las especificaciones técnicas del proyecto.

Bakun pondera las eficiencias correspondientes con los saltos: máximo, nominal y mínimo dentro del rango de operación desde la potencia nominal $P=100\%$ hasta mínima potencia, localizando la zona de mayor peso en Salto nominal entre 80% y 100% de potencia.

TABLA I. EFICIENCIAS PONDERADAS MEDIDAS Y GARANTIZADAS

Eficiencia media ponderada GARANTIZADA (%)	94.38
Eficiencia media ponderada MEDIDA "Witness Test" (%)	94.43

Como puede observarse la eficiencia media ponderada medida durante las pruebas presenciadas cumplieron en forma satisfactoria las garantías contractuales.

4 CAVITACIÓN

La formación de burbujas a partir de núcleos gaseosos microscópicos por efectos hidrodinámicos configura el fenómeno de cavitación, el cual produce deterioros con pérdidas de material debido a la implosión de las mismas sobre los álabes del rodete.

El objetivo principal del ensayo es determinar los márgenes de seguridad y visualización de cavitación asociados a la operación con distintos niveles de restitución.

4.1 Curvas "Sigma Break"

Se caracteriza el punto bajo ensayo, manteniendo constantes el salto, velocidad de rotación y apertura del distribuidor mientras varía el valor de la presión absoluta en la salida del tubo difusor. Ello nos permite visualizar los fenómenos de cavitación correspondientes con distintos niveles de restitución, conjuntamente con la adquisición de los valores de eficiencia, caudal y potencia.

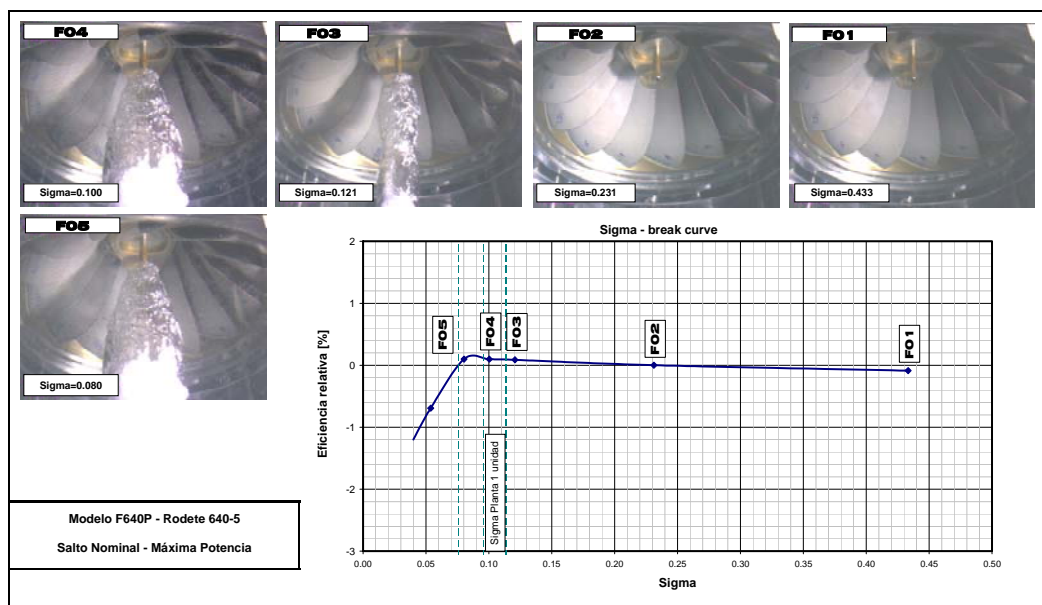


Fig. 4. Curva "Sigma break" del rodete Bakun operando en salto nominal y máxima potencia

En particular, la fotografía F04 correspondiente con Sigma planta 1 (operación con una sola unidad = mínimo nivel de restitución) muestra el rodete libre de efectos de cavitación sobre los álabes.

5 FLUCTUACIONES DE PRESIÓN

Entre los fenómenos de vorticidad característicos de las turbinas Francis y desarrollados fuera de la zona de operación con máxima eficiencia, el vórtice de carga parcial merece una atención particular asociado a las fluctuaciones de presión y torque.

Analizando el comportamiento del flujo en el cono de salida del rotor, se pueden observar las zonas características originadas por los diferentes campos de velocidad y presión, los cuales producen cavidades vaporizadas en el flujo llamadas vórtices.

Con el objeto de visualizar el comportamiento completo de la turbina para un salto constante, en este caso salto máximo, a continuación se presentan secuencialmente las fotografías correspondientes con los distintos caudales unitarios $Q_{1relativo}$ desde máxima potencia hasta apertura mínima.

- Zona de máxima potencia (fotografía P01): encontramos el vórtice de alta carga, estable, con baja intensidad de fluctuaciones y leve rotación en la parte final del vórtice. Nace en la ojiva del rotor y termina en el codo del tubo de aspiración.
- Zona libre de vórtices (fotografías P02 y P03): es la zona de máxima eficiencia donde no se observan fenómenos de separación de flujo.
- Zona de carga parcial (fotografías P04 a P08): está presente el vórtice helicoidal de carga parcial, rotando a una frecuencia de $1/4 \times$ Velocidad rotación turbina. Se desarrolla en el cono del tubo difusor y produce la mayor fluctuación medida en el tubo de aspiración en $Q_{1rel}=0.682$ (fotografía P08).
- Zona de vórtices entre álabes (fotografías P09 y P10): en zona de bajas aperturas del distribuidor, se produce el vórtice entre álabes. Nace en la corona cerca del borde de ataque y se desarrolla en toda la extensión del álabe sin tocar su superficie.

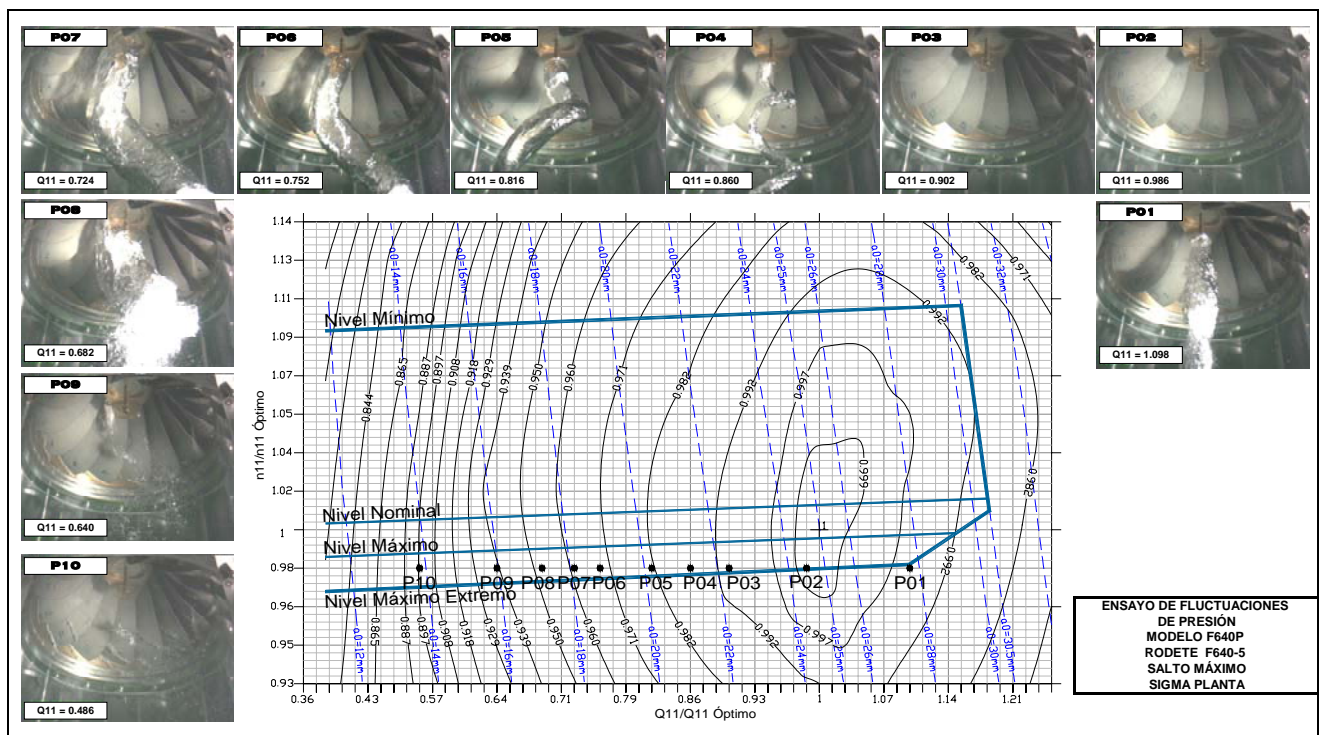


Fig. 5. Visualización del comportamiento del rodete Bakun: correspondiente a salto máximo y sigma planta, desde máxima potencia hasta mínimas aperturas.

6 OTROS ENSAYOS

Adicionalmente a los ensayos de Eficiencia, Cavitación y Fluctuaciones de presión sujetos a verificación de garantías contractuales, se complementó el Reporte Final de Ensayos mediante una serie de pruebas relacionadas con aspectos estructurales y de operación del prototipo:

- Embalamiento “Runaway test”
- Empuje hidráulico axial
- Torque en paletas directrices
- Medición de Caudal por método “Winter Kennedy”

7 CONCLUSIONES

Diferentes etapas del desarrollo hidráulico de la turbina Modelo a escala reducida para el aprovechamiento “Bakun” han sido presentadas en este trabajo.

Se han descrito las pruebas de eficiencia, cavitación y fluctuaciones de presión.

En particular se ha visualizado el comportamiento hidráulico de cavitación, curva “Sigma break” para salto nominal y potencia máxima y un detallado esquema de fotografías del ensayo de fluctuaciones de presión para distintos estados de carga y salto máximo.

En general, el proceso presentado de simulación física por medio del Modelo a escala reducida configura un hito importante en la validación del diseño y la verificación de garantías contractuales del proyecto.

8 REFERENCIAS

- [1] IEC 60193. Norma Internacional, “Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines Model acceptance tests”, 1999.
- [2] B. Beling, C. Calderaro, H. De Vecchi, A. Fedorov, L. Kazachkov, “Equipping the largest plant in southeast Asia”, IAHR, Venezuela, Oct. 2006.