

## ENSAYOS HIDRÁULICOS DE LAS TURBINAS TIPO KAPLAN DEL PROYECTO TOCOMA

*Juan Carlos Cacciavillani, Daniel Rodríguez, Hugo De Vecchi, Bernardo Beling*  
IMPSA HYDRO, Centro de Investigaciones Tecnológicas, Rodríguez Peña 2451, 5503  
Godoy Cruz, Mendoza, Argentina  
[www.impsa.com](http://www.impsa.com)

[juancarlos.cacciavillani@impsa.com](mailto:juancarlos.cacciavillani@impsa.com)  
[danielamancio.rodriguez@impsa.com](mailto:danielamancio.rodriguez@impsa.com)  
[hugo.devecchi@impsa.com](mailto:hugo.devecchi@impsa.com)  
[bernardo.beling@impsa.com](mailto:bernardo.beling@impsa.com)

**Resumen** - El “Aprovechamiento Hidroeléctrico Tocoma”, actualmente en construcción, está ubicado en el “Río Caroní” en la “República Bolivariana de Venezuela”. La Casa de Máquinas albergará 10 unidades generadoras tipo Kaplan con una capacidad instalada total de 2.230 MW.

A través de una licitación internacional realizada por la empresa “EDELCA”, que incluyó una rigurosa competencia técnica, IMPSA obtuvo el contrato de provisión de las 10 unidades generadoras completas. Los modelos hidráulicos fueron desarrollados por cada competidor en su propio laboratorio y finalmente ensayados en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suiza, en donde se realizaron los ensayos independientes que permitieron seleccionar los modelos que cumplimentaban los requerimientos técnicos mínimos solicitados.

Solo dos modelos de todas las empresas involucradas en el proceso licitatorio pasaron exitosamente esta etapa, uno de ellos el de IMPSA.

En el presente trabajo se describe el desarrollo realizado en el Centro de Investigaciones Tecnológicas de IMPSA y los ensayos realizados en las distintas etapas del proceso licitatorio, hasta la validación final del diseño en etapa contractual, por medio de las pruebas de aceptación presenciadas por “EDELCA”.

**Palabras Clave** — Turbinas hidráulicas, Turbinas Kaplan, Ensayos de turbinas, Eficiencia, repetibilidad de mediciones.

## INTRODUCCIÓN

### Datos básicos del Aprovechamiento

Nombre	Proyecto Hidroeléctrico Manuel Piar (Tocoma)
País	República Bolivariana de Venezuela
Cliente	Electrificación del Caroní – “EDELCA”
Capacidad Instalada	2.230 MW
Producción Anual Promedio	~11.900 GWh.

### Datos técnicos de las turbinas

Turbinas Tipo:	Kaplan
Cantidad:	10 unidades
Salto Nominal:	34,65 m.
Diámetro de rodete:	8600 mm.
Velocidad de rotación:	90 rpm.

A través de una licitación internacional realizada por la empresa “EDELCA”, que incluyó una rigurosa competencia técnica, IMPSA obtuvo el contrato de provisión de las 10 unidades generadoras completas. Durante el proceso licitatorio y contractual se siguieron las siguientes etapas:

- Etapa de Desarrollo
- Etapa de Validación y Comparación de Diseños
- Etapa de Verificación de Garantías contractuales

## 1- ETAPA DE DESARROLLO

### Pruebas internas preliminares

El objeto de estas pruebas dentro del proceso licitatorio fue el de desarrollar y perfeccionar el modelo de la turbina hasta cumplimentar las características técnicas mínimas exigidas por “EDELCA”. Esta etapa incluye el diseño hidráulico de la turbina por medio de CFD (“Computational Fluid Dynamics”) y el correspondiente ensayo del modelo físico ensayado en los Laboratorios de cada Oferente.

Cinco Oferentes, entre los que se encontraban la mayoría de los principales fabricantes de turbinas hidráulicas del mundo fueron calificados por “EDELCA” para participar en esta instancia.

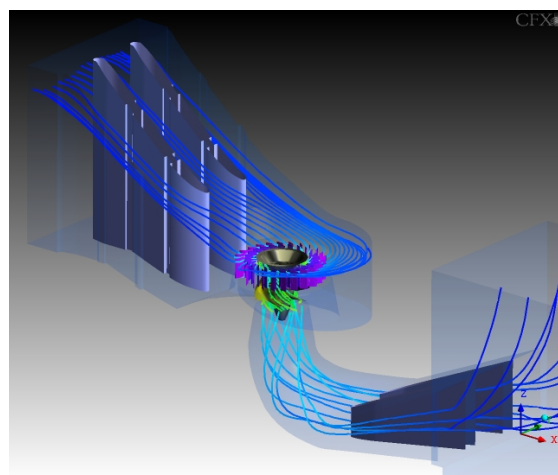
Los requerimientos técnicos solicitaban un nivel de eficiencia y comportamiento a cavitación ambos compatibles con los más altos estándares mundiales para este tipo de turbinas, lo que requería un fuerte trabajo de desarrollo de cada Oferente para, en primera instancia, alcanzar los requerimientos mínimos solicitados, y en segunda, intentar superar los mismos con el objeto de obtener ventajas competitivas en la comparación de las ofertas técnicas.

- **Diseño & Simulación Numérica**

La etapa de diseño preliminar del modelo de IMPSA fue realizada en su Centro de Investigaciones Tecnológicas - CIT. Para este cometido se utilizaron diferentes programas de diseño de turbinas propios, conjuntamente con el software Ansys CFX para la simulación numérica.

Los distintos componentes de la turbina, que incluyen: la toma de agua, la caja semi espiral, la cascada de paletas fijas y de paletas móviles, el rotor de la turbina Kaplan, y el tubo de aspiración fueron simulados numéricamente en modos estacionario y transitorio.

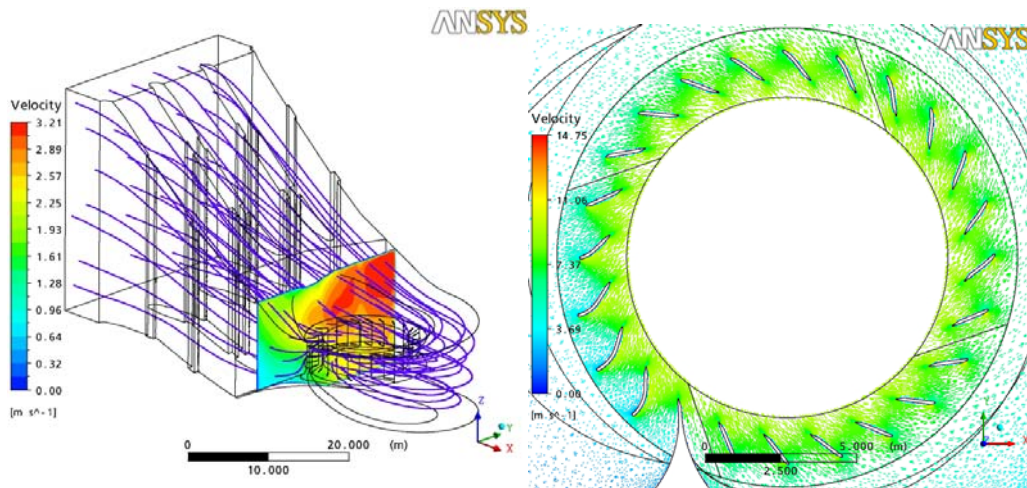
En la Figura 1 se observa la trayectoria seguida por el flujo de agua mediante líneas de corriente simulados en la turbina completa



**FIGURA 1**  
LÍNEAS DE CORRIENTE EN LA TURBINA

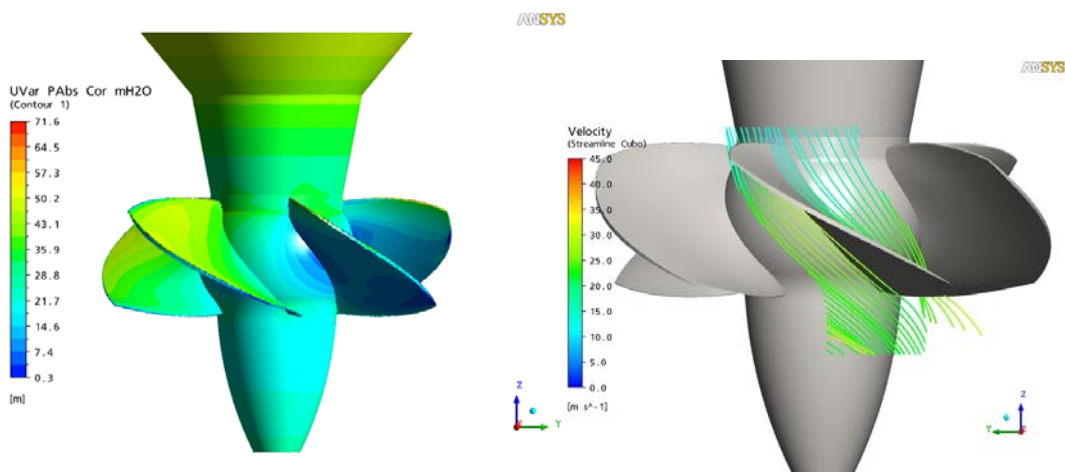
Siguiendo el recorrido del agua, observamos a continuación simulaciones de cada componente, desde la entrada a la obra de toma hasta la salida en el tubo de aspiración.

En la Figura 2 se representa el comportamiento del flujo en la caja semi-espiral mostrando a la izquierda, las líneas de corriente y un corte transversal con la distribución de velocidad del flujo y a la derecha, sobre el plano de simetría de la cascada de las paletas fijas, los vectores correspondientes con el campo de velocidad.



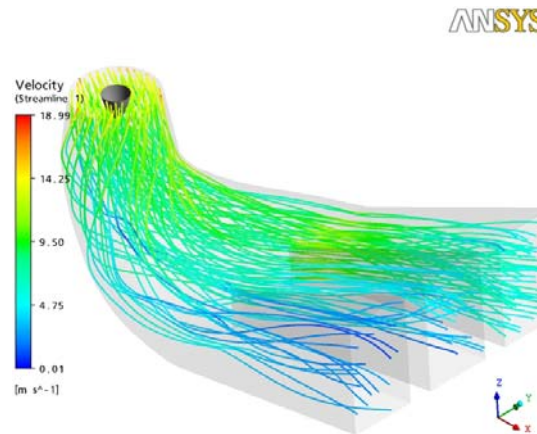
**FIGURA 2**  
LÍNEAS DE CORRIENTE Y CAMPO DE VELOCIDAD EN LA CAJA SEMI ESPIRAL

En la Figura 3 se muestra la distribución del campo de presión estática sobre el cubo del rotor y las líneas de corriente describiendo el movimiento del flujo del agua al pasar entre los álabes de la turbina.



**FIGURA 3**  
ROTOR DE LA TURBINA

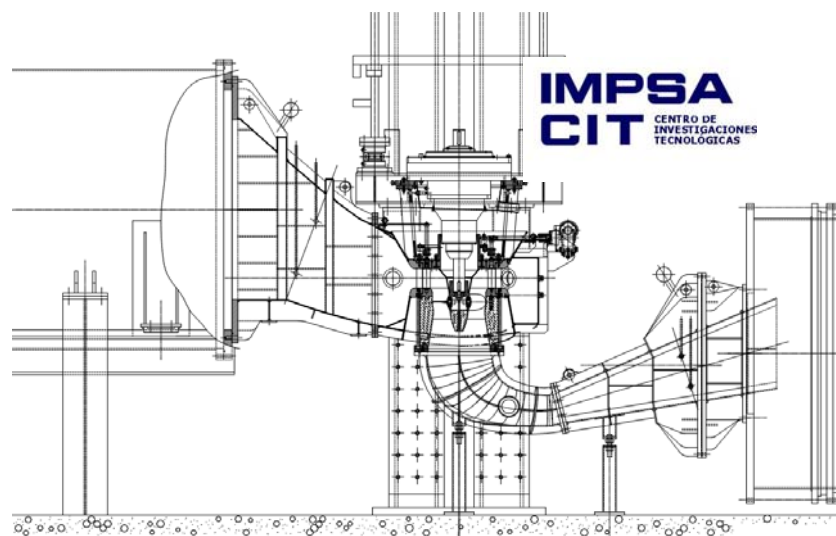
Finalmente, vemos el comportamiento del flujo dentro del tubo de aspiración. Las características (velocidad tangencial, campo de presión, etc.) del flujo entrante a este componente dependen de la condición de operación (caudal, salto) de la turbina y configura una condición de contorno importante en la definición de la simulación.



**FIGURA 4**  
TUBO DE ASPIRACIÓN

- **Ensayos físicos de modelo**

Luego de haber optimizado el pasaje hidráulico por medio de simulación numérica de flujos se construyó el modelo físico (escala 1:21.5) para realizar el ensayo de la turbina. Todos sus componentes fueron fabricados en el taller de modelos del Centro de Investigaciones Tecnológicas de IMPSA, bajo estricto control dimensional.



**FIGURA 5**  
CORTE LONGITUDINAL DEL MODELO



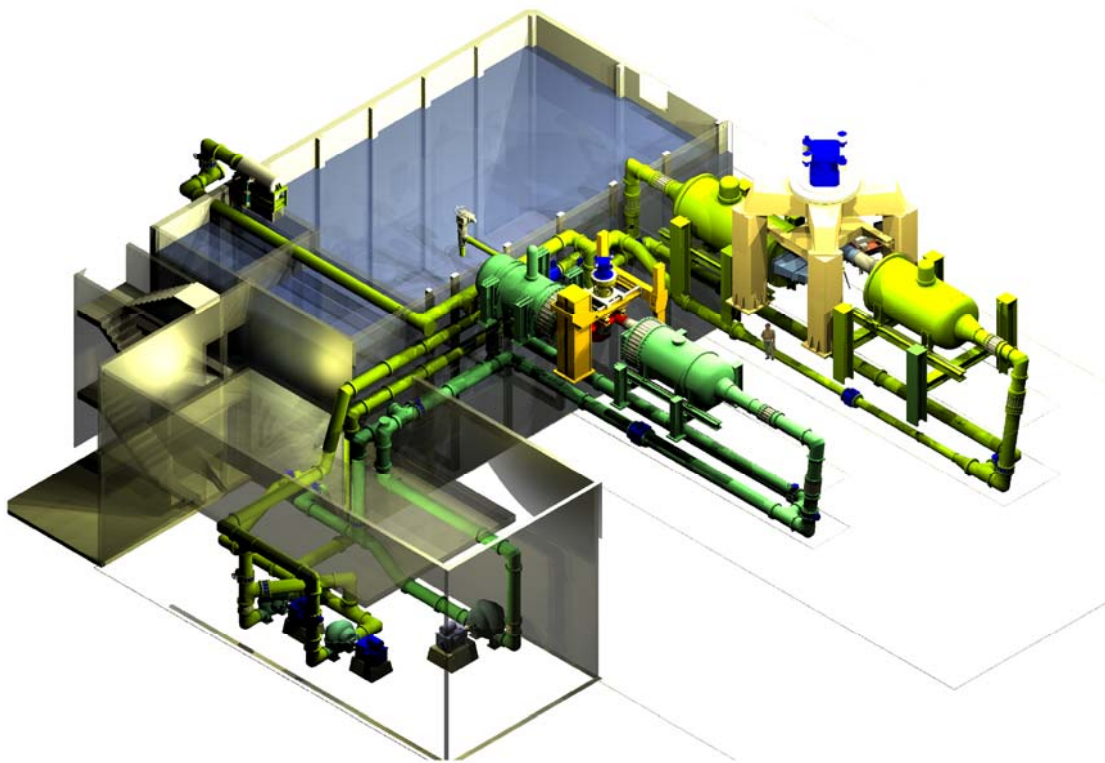
**FIGURA 6**  
MECANIZADO DE UN ÁLABE DEL ROTOR KAPLAN

El paso siguiente consistió en el montaje del modelo en el banco de ensayos del “Laboratorio Hidráulico de IMPSA” para la comprobación del comportamiento hidráulico de la turbina (Figura 6).

Los ensayos fueron realizados bajo total cumplimiento de los estándares internacionales dados por la norma IEC 60193 “Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines- Model acceptance tests” para este tipo de ensayos y el alcance de los mismos incluyó: ensayos de eficiencia, cavitación, embalamiento y fluctuaciones de presión y torque.



**FIGURA 7**  
FOTOGRAFÍA DEL MODELO MONTADO EN EL BANCO UNIVERSAL DE BAJA CAÍDA



**FIGURA 8**  
VISTA GENERAL DE LOS BANCOS DE ENSAYOS DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS  
HIDRÁULICAS DE IMPSA.

Los resultados de los ensayos del modelo desarrollado demostraron que los requerimientos mínimos de eficiencia y cavitación solicitados por “EDELCA” fueron atendidos y superados.

La eficiencia media ponderada medida en esta etapa fue de 95.03% con una banda de incertidumbre de  $\pm 0.24\%$ .

Luego de realizadas las pruebas, el modelo en cajas selladas, acompañado por el reporte de resultados, fue enviado a Suiza para cumplimentar con la siguiente etapa de validación.

## **2- ETAPA DE VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE DISEÑOS**

### **Pruebas de Modelo en Laboratorio Independiente**

Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas “LMH” perteneciente a la “École Polytechnique Fédérale en Lausanne” “EPFL”, Suiza, laboratorio independiente internacionalmente reconocido para la realización de este tipo de ensayos.

El objeto de estas pruebas incluidas dentro del proceso licitatorio fue la verificación de las características técnicas mínimas requeridas por “EDELCA” y garantizadas por cada Oferente. Los resultados de estas pruebas fueron utilizados para seleccionar a las empresas Oferentes que continuaban el proceso licitatorio, y para la evaluación y comparación final de las ofertas.

Solo la aprobación satisfactoria de estas pruebas permitiría poder continuar con el proceso licitatorio.

De los cinco Oferentes calificados por “EDELCA” en el proceso licitatorio, solo tres presentaron en tiempo y forma los modelos en “EPFL” para su ensayo y solo dos lograron pasar el ensayo en forma exitosa, ente ellos IMPSA.

### **Recepción de Modelos y sorteo de turnos de pruebas**

Para la realización de estas pruebas dentro del proceso licitatorio se incluyó una instancia denominada: “Recepción de modelos y sorteo de turnos de pruebas”.

En el denominado “Acto Público N°1”, se determinó por sorteo el orden para la realización de las pruebas de modelos y se indicó fecha y hora de apertura de las cajas selladas conteniendo los modelos de los Oferentes. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Máquinas Hidráulica y llevado a cabo por expertos de “EPFL”, en presencia de representantes de “EDELCA” y de IMPSA.

### **Resultados**

Los controles y ensayos realizados incluyeron mediciones dimensionales de los modelos, verificación de eficiencia, cavitación y fluctuaciones de presión de la turbina.

La eficiencia media ponderada medida en esta etapa fue de 94.99% con una banda de incertidumbre de  $\pm 0.239\%$ .

## **3 - ETAPA DE VERIFICACIÓN DE GARANTÍAS CONTRACTUALES**

### **Pruebas presenciadas**

Luego de adjudicado el Contrato a IMPSA, el modelo previamente enviado desde Suiza a la Argentina, fue utilizado para la realización de las pruebas y verificaciones finales. Los Ensayos Finales fueron realizados en el Laboratorio de Hidráulica de IMPSA, en presencia de representantes de la empresa “EDELCA” y expertos internacionales con el objeto de corroborar los valores garantizados en la oferta.

Los controles y ensayos realizados incluyeron análisis dimensional final del modelo, verificación de eficiencia, cavitación, embalamiento, fluctuaciones de presión y de



torque, Winter Kennedy, empuje axial y ensayo de torque en paletas directrices y álabes del rodete.

La eficiencia media ponderada medida en esta etapa fue de 95.09% con una banda de incertidumbre de  $\pm 0.24\%$  .

### **CONCLUSIONES**

Diferentes etapas del desarrollo de las turbinas para el aprovechamiento “Tocoma” seguidas por IMPSA han sido presentadas en este trabajo.

Una excelente repetibilidad entre las mediciones realizadas en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de IMPSA y el laboratorio independiente de “EPFL” fue obtenida, lo que convalida una vez más la precisión de las mediciones realizadas por IMPSA en su laboratorio de ensayos.

Un largo, ordenado y transparente proceso licitatorio, que incluyó una competencia técnica en el ámbito mundial, permitió a IMPSA obtener el contrato para la provisión de estas turbinas que en su tipo y en términos de potencia serán las más grandes del mundo.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Diseño hidráulico de los rodetes Kaplan de Dahua. Leopoldo D. Millán, Lucas Varela, Daniel Rodríguez, Bernardo Beling. MECOM 99, 6 al 10 de Septiembre de 1999.
- [2] Problemas de vibraciones y fluctuaciones de presión en una turbina hidráulica de tipo Francis con amplio rango de salto. Leopoldo Millán, Lev Kazachkov, Andrei Fedorov, Hugo De Vecchi, Bernardo Beling. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Brasil, Octubre 2004
- [3] Hydraulic design of Kalayaan Pump-Turbines. Leopoldo Millán, Andrei Fedorov, Daniel Rodríguez, Lev Kazachkov, Hugo De Vecchi. XI ERIAC, Paraguay, Mayo 2005
- [4] Diseño hidráulico y simulación de fluidos en una turbina Francis de 340MW para el proyecto hidroeléctrico Bakun. Lev Kazachkov, Andrei Fedorov, Hugo De Vecchi, Bernardo Beling. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Venezuela, Octubre 2006
- [5] Ansys CFX – User`s Guide. Ansys Inc. Southpointe 275 Technology Drive. Canonsburg, PA 15317. USA.

### **COPYRIGHT**

“Copyright © 2010. “Juan Carlos Cacciavillani, Daniel Rodríguez, Hugo De Vecchi, Bernardo Beling”: The author assigns to UADI/CAI a license to reproduce this document for the congress purpose provided that this article is used to publish in full or in an abbreviated or edited form in the congress Internet website, on CD and in printed form within World Congress and Exhibition: ENGINEERING 2010-ARGENTINA`s proceedings.”