

## Prácticas Frecuentes en el Diseño y Fabricación de Microturbinas Hidráulicas: Estudio de Casos

Ariel R. Marchegiani<sup>a\*</sup>, Orlando A. Audisio<sup>b</sup>, Victor H. Kurtz<sup>c</sup>

<sup>a</sup> LA.M.HI., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue (UNCo), Neuquén, Argentina.

<sup>b</sup> LA.M.HI., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue (UNCo), Neuquén, Argentina.

<sup>c</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UnaM), Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar, orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar, kurtzvh@gmail.com

---

### Resumen

En una producción "artesanal" de turbinas, que generalmente es llevada adelante por fabricantes locales que no se dedican exclusivamente al tema, y que no tienen un know-how apropiado, muchas veces sus productos presentan defectos o malos diseños tanto en la parte hidráulica como mecánica, dejando como resultado máquinas que no tienen una eficiencia adecuada e inclusive un mal funcionamiento. La producción de equipos que no cumplen adecuadamente con las prestaciones requeridas por los usuarios retrae el interés en las energías renovables, colocándola en un escenario más difícil de penetración.

En este trabajo se presentan varios casos como los mencionados anteriormente, conjuntamente con las soluciones presentadas, que surgieron a partir del estudio de dichos casos en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Universidad Nacional del Comahue. Como consecuencia surge el apoyo que deben brindar las instituciones, ONG's y entes gubernamentales, a estos productores locales a fin de brindar un producto de calidad, que satisfaga la demanda energética con un adecuado nivel de eficiencia. En este sentido, se presentan algunos programas que están siendo llevados adelante por este laboratorio y fabricantes locales.

**Palabras Clave:** Turbinas hidráulicas, Micro turbinas, Ensayos.

---

### Abstract

In a "handmade" production of turbines, which is generally carried out by local manufacturers who are not exclusively dedicated to the subject, and do not have appropriate know-how, often their products have defects or bad designs both in the hydraulic and mechanical part, leaving as a result machines that do not have an adequate efficiency and even a malfunction. The production of equipment that does not comply adequately with the services required by users reduces the interest in renewable energy, placing it in a more difficult scenario of penetration.

In this work, several cases such as those mentioned above are presented, together with their solutions presented, which arose from the study of such cases in the Laboratory of Hydraulic Machines of Universidad Nacional del Comahue. As a consequence, comes the support that institutions, NGOs and government entities must provide to these local producers in order to provide a quality product that meets energy demand with an adequate level of efficiency. In this sense, some programs that are being carried out by this laboratory and local manufacturers are presented.

**Keywords:** Hydraulic turbines, Micro turbines, Tests.

### SÍMBOLOS

$H_N$	Altura Neta .
$Q$	Caudal .
$P_{eje}$	Potencia en el eje .
$N$	Velocidad de rotación
$D$	Diámetro de la turbina
$B$	Ancho de la turbina tipo Michell - Banki
$D_p$	Diámetro primitivo de la turbina tipo Pelton
$z$	Número de álabes

## 1. Introducción

Para cualquier país en vías de desarrollo fundamentar un programa de micro y pequeñas centrales sobre la base de la importación total de los equipos, resulta poco atractivo y con múltiples dificultades.

Es necesaria la producción local del equipamiento principal, muy caro en el mercado internacional, de producción mecánica muy especializada, donde el principal valor añadido es el know-how y donde con pocos materiales se logran altísimos valores de producción, lo que resulta de gran interés para la industria local.

El diseño y la fabricación de turbinas llevan aparejado un conjunto de técnicas que conforman un know-how particular que está regulado, custodiado y protegido por los principales productores, pocos, por cierto, básicamente europeos y norteamericanos, aunque algunos fabricantes de los países en vías de desarrollo producen bajo licencia de estos fabricantes.

A nivel internacional, los libros de texto y los programas universitarios, en relación con la fabricación de turbinas, por lo general no pasan de criterios preliminares, dejando de lado los detalles constructivos y de diseño mecánico.

Los factores antes mencionados traen aparejado la aparición de una producción, que podríamos llamar “artesanal”, de turbinas y que es llevada adelante por fabricantes locales que no se dedican exclusivamente al tema, y que no tienen un know-how apropiado. Estos productos, muchas veces, presentan defectos o malos diseños tanto en la parte hidráulica como mecánica, dejando como resultado máquinas que no tienen una eficiencia adecuada e inclusive un mal funcionamiento.

La producción de equipos que no cumplen adecuadamente con las prestaciones requeridas por los usuarios retrae el interés en las energías renovables, colocándola en un escenario más difícil de penetración.

A continuación, se presentan varios casos como los mencionados anteriormente, conjuntamente con las soluciones presentadas, que surgieron a partir del estudio de dichos casos en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Universidad Nacional del Comahue. Todas las turbinas ensayadas pertenecen a fabricantes locales.

## 2. Casos Analizados

### 2.1. Caso 1: Pico Turbina Banki 1 kW

El Primer caso analizado [1] es el de una pico turbina tipo Banki (Figura 1). Se trata de una turbina Banki para bajo salto que el fabricante pretendía estandarizar para este tipo de saltos. El diseño se basó en la teoría clásica para este tipo de máquinas siguiendo la bibliografía de acceso público.

Las características de diseño de la maquina ensayada son las siguientes:  $H_N$ : 3m,  $Q$ : 65 l/s,  $n$ : 530 rpm,  $P_{eje}$  (prevista en eje): 1234W, Ancho Efectivo B: 250 mm, D: 120mm,  $D1/D2= 0,64$ , Angulo de admisión:  $120^\circ$ , N° de álabes  $z$ : 19.



Fig. 1. Turbina Banki 1 kW

Se realizaron ensayos para una gama de alturas de  $H_N = 3,00$  m,  $H_N = 3,45$  m y  $H_N = 3,75$  m, a fin de comprobar la performance de la turbina a diferentes alturas. Los resultados se muestran en las figuras 2 y 3. Los mejores valores de rendimiento fueron obtenidos para una altura de ensayo de 3,75 m., alcanzándose valores puntuales de 25%.

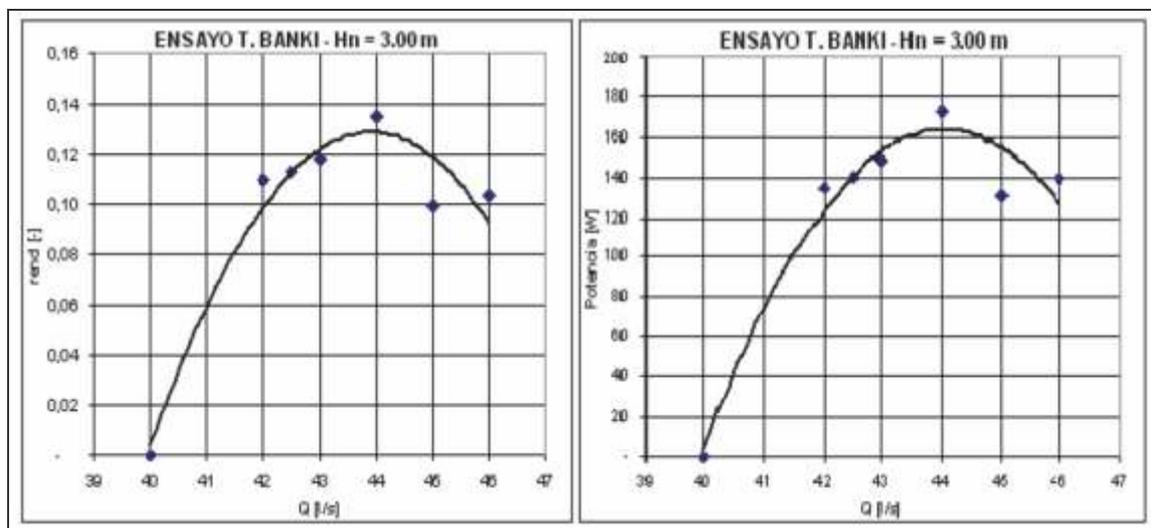


Fig.2. resultados del ensayo para  $H_N = 3$  m

Como surge de los gráficos anteriores la turbina no alcanzó el rendimiento esperado ni se logró el funcionamiento en el punto de diseño. De hecho, surge del ensayo que su punto óptimo de funcionamiento no concuerda con los valores de diseño.

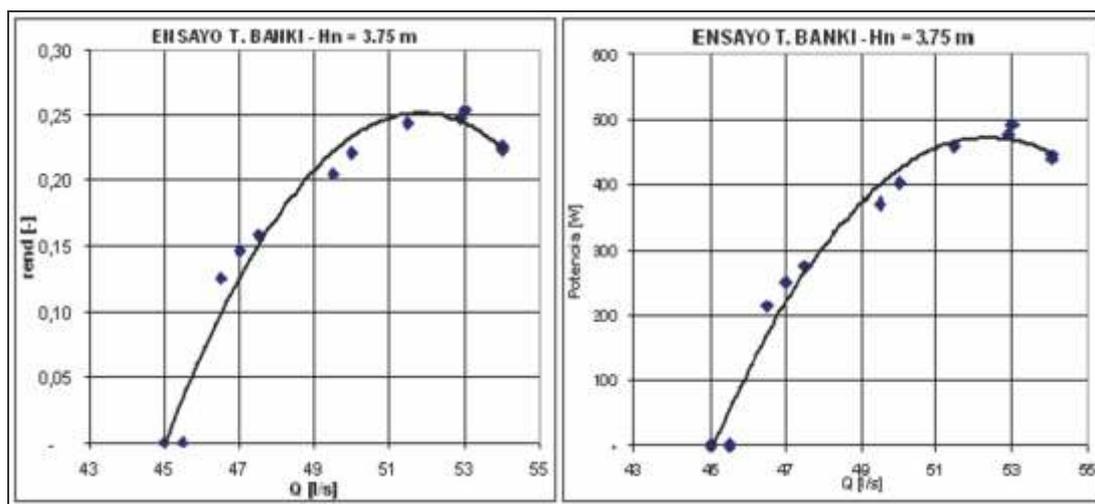


Fig.3. resultados del ensayo para  $H_N = 3.75\text{m}$

Del análisis del ensayo y los resultados obtenidos, además de una inspección detallada de la turbina surge que los bajos rendimientos observados pueden deberse a defectos de fabricación en sí. Se observó el flujo en el inyector por medio de una ventana de acrílico que se colocó aprovechando una abertura de inspección, pudiendo verse desprendimientos en la acometida del flujo a los álabes, lo que restringe el caudal turbinado (figura 4).

Los detalles de fabricación que inciden en el rendimiento de esta máquina son fundamentalmente mala terminación de las soldaduras, huelgos muy grandes entre las piezas rotantes y estacionarias lo que produce un bajo rendimiento volumétrico, y también una mala interacción entre rotor e inyector.

Se le recomendó al fabricante de la máquina un rediseño completo de la turbina ya que, como se dijo anteriormente, era intención de éste producir esta máquina de manera estandarizada.



Fig.4. característica del flujo a la entrada de los álabes del rotor

## 2.2. Caso 2: Turbina tipo Pelton de 3kW

El segundo caso que se analiza es el de una turbina tipo Pelton [2] (Figura 5). Se trata de una turbina Pelton de dos inyectores construida con accesorios galvanizados estándar. Las

características de diseño de la máquina ensayada son las siguientes:  $H_N$  : 48m,  $Q$ : 16 l/s,  $D_p$  : 300 mm, N° de álabes  $z$ : 21, N° de inyectoros  $i$  : 2.



**Fig. 5. Turbina tipo Pelton de 3kW**

Una característica particular de esta máquina es que su descarga se realizaba mediante una tubería de PVC de 110 mm ya que el propietario desistió de hacer canal de descarga.

La turbina llegó al laboratorio para verificar su funcionamiento ya que la misma no podía alcanzar condiciones de régimen. Se tuvo la posibilidad de reemplazar la tapa de frontal de la carcasa por una superficie transparente a fin de analizar el comportamiento del flujo.



**Fig. 6. Mal funcionamiento de la descarga**

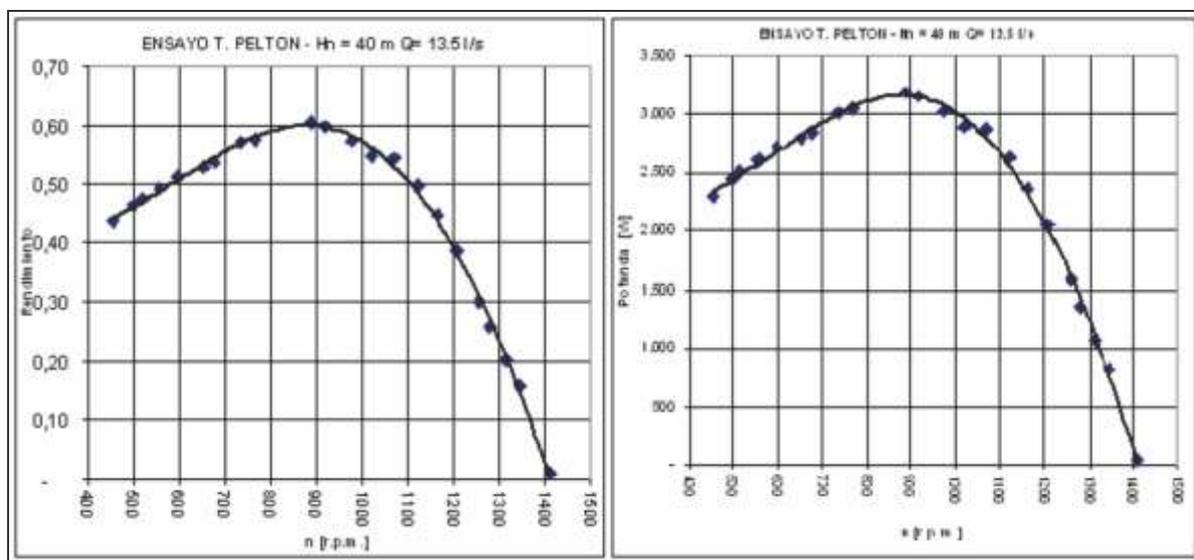
A pedido del cliente se realizó un ensayo a  $H_n = 40$  m y  $Q = 13.5$  l/s. En el mismo se verificó que la descarga de la turbina no era suficiente para evacuar el caudal por lo que la máquina se ahogaba. Esto se puede observar en las figuras siguientes: en la figura 6 se observa el funcionamiento a los 20 segundos de comenzado el ensayo, donde se ve el comienzo del llenado de la descarga, y el funcionamiento a los 30 segundos de comenzado el ensayo donde la máquina ya está totalmente ahogada. Esto no permitía alcanzar las condiciones de régimen.

En la figura 7 se puede observar la descarga del caudal por la tubería de PVC de 110 mm de diámetro, lo que en el aprovechamiento, era agravado por la longitud del caño de descarga.



**Fig. 7. Detalle de la descarga**

Comprobado esto se procedió a retirar el fondo de la carcasa a fin de permitir el escurrimiento adecuado del caudal y se volvió al ensayo en las condiciones mencionadas anteriormente, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación (figura 8).



**Fig. 8. Resultados del ensayo**

Como se observa, se obtuvo un rendimiento puntual del 61% para una potencia de 3,2 kW y una velocidad de rotación de 900 r.p.m.. Estos valores de rendimiento son un poco inferiores a los esperados para este tipo de máquinas. Según el análisis realizado, esta disminución puede deberse a que el manifold de inyectores construido con piezas galvanizadas estándar no es de un buen diseño y que su carcasa es muy angosta influyendo en la normal evacuación del caudal turbinado.

### 2.3. Caso 3: Picoturbina tipo Pelton de 1kW

En el siguiente caso se presenta el ensayo de un grupo generador compuesto por una pico turbina tipo Pelton de eje vertical, y un motor asincrónico acoplado directamente a ésta, utilizado como generador [4][5]. Las características de la maquina ensayada son las siguientes: Datos de diseño:  $H_N$ : 60m,  $Q$ : 13.5 l/s,  $n$ : 910 rpm,  $D$ : 120 mm,  $N^\circ$  de inyectores  $i$ : 1,  $N^\circ$  de álabes  $z$ : 16. El conjunto puede observarse en la figura 9. La turbina fue acoplada a una tubería de 3 pulgadas de diámetro.

El programa contempló la realización de ensayos de rendimiento para distintas velocidades de rotación y la determinación del punto de óptimo rendimiento. Esto es a fin de determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de la máquina.

La turbina no poseía inyector con regulación por lo que el ensayo se tomó como apertura de inyector fija  $A_0 = A_{0\max} = 100\%$ .

El ensayo se realizó sobre el conjunto turbina generador. Como se dijo anteriormente, como generador se utilizó un motor marca WEG de 1HP y 910 r.p.m. (foto N°3), al cual se le acopló un banco de capacitores compuestos por capacitores de  $16\mu\text{F}$  (uno por fase), según las conexiones estrella – triángulo común en estos casos.

Los mejores valores de rendimiento fueron obtenidos para una altura de ensayo de 60 m alcanzándose valores puntuales de 40%. En general el rango de rendimientos es de un 30% a un 40%, con potencias que oscilan entre 400 y 500 Watts, con valores de frecuencia que oscilaron entre 40 y 45 hz. Los resultados se muestran en la figura 10.



**Fig. 9. Picoturbina Pelton de 1 kW.**

Durante los ensayos se obtuvo un funcionamiento muy bueno y muy estable de esta máquina, aunque la frecuencia no se pudo mantener en valores estándar, alcanzándose valores ente 40 y 45 hz para los mejores rendimientos y potencias.

Los rendimientos relativamente bajos observados pueden deberse a que se utilizó un motor como generador, con la consabida reducción del rendimiento cuando se utiliza de esta forma. Del análisis de los resultados surgió que el motor seleccionado para ser utilizado como generador no fue el más adecuado para este caso.

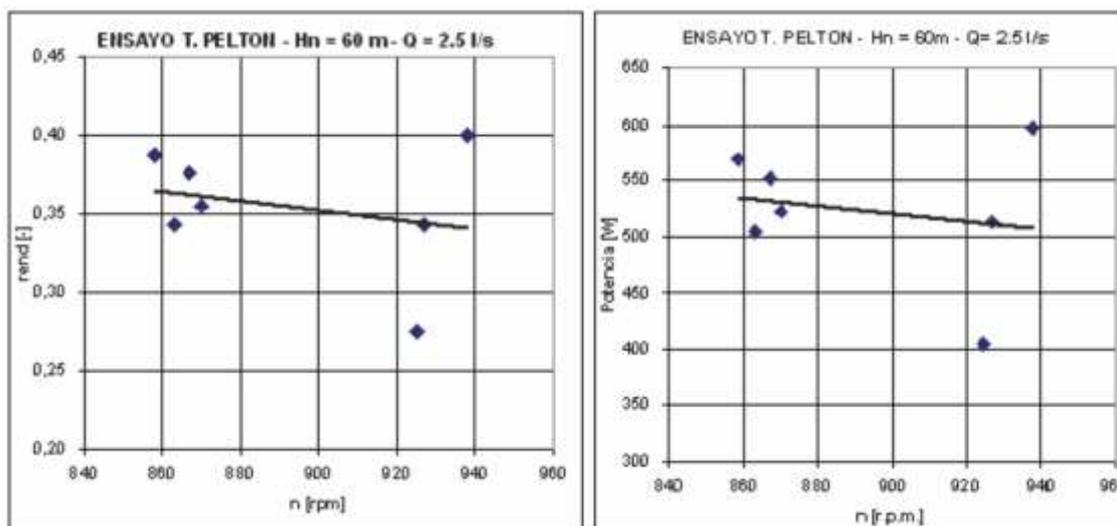


Fig. 10. Resultados del ensayo

Durante los ensayos se obtuvo un funcionamiento muy bueno y muy estable de esta máquina, aunque la frecuencia no se pudo mantener en valores estándar, alcanzándose valores ente 40 y 45 hz para los mejores rendimientos y potencias.

Los rendimientos relativamente bajos observados pueden deberse a que se utilizó un motor como generador, con la consabida reducción del rendimiento cuando se utiliza de esta forma. Del análisis de los resultados surgió que el motor seleccionado para ser utilizado como generador no fue el más adecuado para este caso.

#### 2.4. Caso 4: Turbina tipo Pelton de 6kW.

En el último caso se analiza el funcionamiento de un grupo generador compuesto por una turbina tipo Pelton y un generador sincrónico monofásico [6] (Figura 11), conjuntamente con su regulador electrónico de frecuencia. Se trata de una turbina Pelton de dos inyectores de eje horizontal. Las características de diseño de la maquina ensayada son las siguientes:  $H_N$  : 38m,  $Q$ : 25 l/s,  $D_p$  : 285 mm,  $N^\circ$  de álabes  $z$ : 21,  $N^\circ$  de inyectores  $i$  : 2.



Fig. 11. Turbina tipo Pelton 6 kW

Esta turbina presenta un muy buen diseño y construcción. Los detalles constructivos fueron especialmente tratados por el fabricante, quien expresó que el diseño hidráulico se realizó siguiendo la bibliografía existente, de procedencia inglesa, tomándose de la misma la metodología de diseño para cucharas, inyector (tobera) y carcaza.

El ensayo se realizó conectando la turbina a una tubería de 6" de diámetro, procediéndose a suministrar caudal y altura hasta tratar de alcanzar los valores de diseño. En la figura 12 puede verse a la máquina en el momento del ensayo.



**Fig. 12. Ensayo de la turbina**

Se conectó el generador a resistencias a fin de darle la carga necesaria y se midieron los parámetros de funcionamiento tales como altura, caudal, voltaje y corriente generada y frecuencia de generación.

Los inconvenientes encontrados durante este ensayo fueron tanto de índole hidráulica como eléctrica, tal como se explica a continuación:

- No se pudo alcanzar el punto de diseño ya que para alcanzar la altura mencionada se debió aportar más caudal que el calculado. En vista de esto se fijaron los valores de ensayo en  $H_N = 36$  m y  $Q = 31$  l/s.
- Se alcanzó un generación de 6111 W, que era más de lo que el fabricante esperaba. No obstante esta generación se obtuvo con valores de voltaje y frecuencia no adecuados. Los valores arrojados por el ensayo fueron: 210 volt y 57 Hz. Como se observa la frecuencia está muy por encima del valor nominal (50 Hz).
- Las velocidades de rotación de la turbina y el generador fueron adecuadas. El funcionamiento de la turbina fue muy estable, y no se presentaron vibraciones apreciables. El rendimiento obtenido para el conjunto turbina generador fue de un 60%, un valor un poco por debajo de lo esperable para una máquina de estas características.

En el análisis de los resultados surgidos de los ensayos surgen las siguientes conclusiones:

El problema respecto a no alcanzar el punto de diseño se debe fundamentalmente a un diámetro de boquilla excesivo, lo que hace que la máquina demande más caudal para la altura de diseño. Esto surge de los coeficientes de boquilla adoptados de la bibliografía antes mencionada.

El problema de la generación fuera de la frecuencia adecuada, es un problema inherente al generador sincrónico utilizado. Dicho generador no posee AVR y su generación es de mala calidad. Este es un problema recurrente con el que nos hemos encontrado en nuestro país. No existen fabricantes de generadores monofásicos (y podríamos decir que también trifásicos) de baja potencia con buena regulación de voltaje. En general es muy difícil conseguir generadores sincrónicos de buena calidad por debajo de los 15 KVA.

Las recomendaciones al fabricante fueron un rediseño de las toberas a fin de alcanzar el punto óptimo de diseño y en cuanto al generador, estudiar la posibilidad de acoplar al mismo un AVR externo.

### 3. Conclusiones

Como se pudo observar, los fabricantes artesanales de turbinas hidráulicas se enfrentan a algunos desafíos importantes en el área del diseño y construcción de pequeñas turbinas hidráulicas ya sea por falta de conocimientos, información y/o know-how adecuado. En consecuencia surge el apoyo que se debe brindar a éstos por parte de las instituciones, ONG's y entes gubernamentales, a fin de brindar un producto de calidad, que satisfaga la demanda energética con un adecuado nivel de eficiencia. En este sentido, el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la U.N.Co. viene llevado adelante algunos programas conjuntamente con fabricantes locales a fin de lograr diseños adecuados y eficientes, tratando de incrementar el interés en las energías renovables, y propiciar un escenario de penetración más favorable.

### Referencias

- [1] Marchegiani, Ariel R.; Audisio, Orlando A.; Ensayo LAMHI-1908/08-1: Ensayo para la Determinación del Campo de Operación de una Turbina Tipo Banki - Reporte Final, Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Universidad Nacional del Comahue, Neuquén.
- [2] Marchegiani, Ariel R.; Audisio, Orlando A.; Ensayo LAMHI-1003/09-1, : Ensayo para la Determinación del Campo de Operación de una Turbina Tipo Pelton de Eje Horizontal - Reporte Final, Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Universidad Nacional del Comahue, Neuquén.
- [3] Marchegiani, Ariel R.; Audisio, Orlando A.; Ensayo LAMHI-1108/08-2, : Ensayo para la Determinación del Campo de Operación de una Turbina Tipo Pelton - Reporte Final, Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Universidad Nacional del Comahue, Neuquén.
- [4] Víctor H. Kurtz; Ariel R. Marchegiani; Orlando A. Audisio (2009B). Metodología y Ensayo de una Picoturbina Pelton Compacta. IV C3N Congresso Da Academia Trinacional de Ciencias- Foz Do Iguacú - PR – Brasil.
- [5] Marchegiani, Ariel R.; Audisio, Orlando A.; Ensayo LAMHI-2506/09-2, : Ensayo para la Determinación del Campo de Operación de un conjunto Turbina Tipo Pelton de Eje Horizontal y Generador Sincrónico - Reporte Final, Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Universidad Nacional del Comahue, Neuquén.
- [6] Víctor H. Kurtz; Ariel R. Marchegiani; Orlando A. Audisio (2009). Ensayo de Una Picoturbina Pelton Compacta, de Fabricación Local. XIII Encuentro Latinoamericano y del Caribe Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos ELPAH – Cajamarca – Perú.