

Ensayos de Laboratorio en Pequeñas Turbinas Hidráulicas

Ariel R. Marchegiani ^{a,*}, Victor H. Kurtz ^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue (UNCo), Neuquén, Argentina.

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar, kurtzvh@fio.unam.edu.ar

Resumen

El Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería (F.I.) de la Universidad Nacional del Comahue tiene establecido un programa de trabajo para el diseño, desarrollo y ensayo de pequeños grupos turbo generadores hidráulicos que puedan ser fabricados íntegramente por la industria local y que sean destinados a pequeños consumidores localizados en zonas poco pobladas y con recursos hídricos a su alcance y de esta manera permitir que estos accedan a la energía hidroeléctrica que generaría esta máquina. El programa de trabajo que fue elaborado para una gama específica de potencias utilizadas básicamente en consumidores domésticos; incluye un protocolo de pruebas en turbinas utilizando el banco de ensayos que posee la institución. Además, de distintos convenios y proyectos de investigación conjunta con docentes investigadores Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. En este artículo se presentan dichos ensayos realizados y los procedimientos utilizados en éstos.

Palabras Clave – Banco de ensayos, Ensayos, Experimentación, Microturbinas, Parámetros de ensayo.

1. Introducción

Se pueden distinguir tres categorías de actores en el campo de las turbinas hidráulicas. Los fabricantes de grandes máquinas, las universidades o institutos privados y los fabricantes de pequeñas turbinas. Las primeras dos categorías realizan numerosos ensayos de laboratorio, o para actualizar las técnicas de Máquinas hidráulicas y desarrollar nuevos métodos computacionales, o mejorar sus conocimientos de los fenómenos físicos tal como cavitación, flujo no permanente, etc. Considerando los altos costos de estos ensayos, estos métodos son solo aplicables a las grandes máquinas, diseñadas especialmente de acuerdo con las características de un sitio dado.

Como los costos de desarrollo de un ensayo de modelo son del mismo orden de magnitud que los de una pequeña central hidráulica completa, los fabricantes independientes de pequeñas turbinas (aquellos que no están asociados con grandes grupos industriales que incluyen fabricantes de grandes turbinas) obviamente no pueden abordar estos trabajos de laboratorio. Por lo que usualmente utilizan un método que consiste en diseñar un set de turbinas standard, las cuales entonces pueden cubrir más o menos bien el sitio bajo construcción, o crear modelos a escala reducida de grandes turbinas, adaptando y simplificando los perfiles sin medir las consecuencias.

El resultado de este último método es que, prácticamente ninguna máquina construida de esta manera presenta un desempeño óptimo desde el punto de vista hidráulico. Hay diversas posibles consecuencias. Por ejemplo, que los rendimientos garantizados (bajo iguales condiciones de altura y caudal) no puedan sostenerse, implicando pérdida de producción, sobrecargando excesivamente las

*Autor en correspondencia.

turbinas que operan bajo una exagerada apretura de distribuidor para alcanzar la potencia requerida. Muchos de estos problemas pueden llevar a una ruptura mecánica.

Estos problemas perjudican obviamente al fabricante de la turbina que tiene que afrontar las multas por no respetar garantías, y al dueño de la central que no puede obtener la producción planificada.

Por eso, en las tareas recepción e investigación sobre nuevas tecnologías que involucren ensayos de máquinas hidráulicas las instituciones como Universidades y Escuelas de Estudios Terciarios, en los cuales se posean los medios para llevar adelante estas tareas, juegan un papel importante.

2. El Laboratorio de Maquinas Hidráulicas

Los ensayos de rendimiento y determinación del campo de operación de una turbina hidráulica son llevados a cabo en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, a fin de determinar la performance, rendimiento y campo de operación de dicha turbina. Los ensayos se realizan para un rango de caudales y alturas a fin de determinar el campo de operación de esta. Los métodos de medición son aplicados conforme a las reglas de la IEC [1], la BSI [2], y la DIN [3].

Se determinan el rendimiento óptimo de la turbina con su correspondiente punto de operación. Se establece además el campo de operación de la máquina para distintos caudales y alturas. Los resultados son analizados y combinados en distintos diagramas que dan un conocimiento acabado del funcionamiento de la turbina hidráulica.

2.1. El Banco de Ensayos

Con motivo de los requerimientos propios del banco, el edificio posee desniveles para reproducir fielmente condiciones de funcionamiento y un espacio adecuadamente optimizado para montar y desmontar los distintos circuitos hidráulicos proyectados a partir de la estructura principal.

El banco de Ensayo es de circuito abierto y está conformado por los siguientes elementos: Un sistema de bombeo compuesto por dos (2) grupos impulsores (con motor eléctrico) tipo centrífugos de eje horizontal de similares características. Estos equipos toman el agua de una cisterna de una capacidad media de 5 m³, para impulsarla a los circuitos de operación. Estas bombas están montadas de modo tal que las mismas pueden conectarse en serie o en paralelo mediante conectores y válvulas estratégicamente instalados. Esto permite que el banco de ensayo pueda trabajar con una gama de alturas y caudales lo suficientemente amplia como para permitir ensayar diversos tipos de Turbomáquinas hidráulicas.

Cada unidad de bombeo tiene una capacidad de treinta y cinco (35) l/s y una altura estática en la descarga de treinta y dos (32) m. Están acopladas directamente a los motores eléctricos de 1500 RPM y una potencia de 35 kW.

Además, el banco cuenta con un equipo auxiliar de bombeo de una potencia nominal de 30 kW y una altura Manométrica de 100 m, el cual puede ser utilizado para la realización de ensayos de gran altura, como ser pequeñas turbinas tipo Pelton.

Los circuitos de ensayo están conformados por dos líneas: una principal de 8 pulgadas de diámetro nominal y uno secundario de 6 pulgadas de diámetro nominal. Este último circuito es utilizado para realizar ensayos de baja capacidad o también, como sistema By-pass en caso de estar en operación el circuito principal de 8 pulgadas de diámetro.

La tubería principal del circuito, que comprende, en línea rectilínea, de aproximadamente 13 m, su conexión a las bombas y sus descargas, igual que sus accesorios correspondientes, son de acero y de calidad normalizada según normas ASTM.

Las uniones entre tramos de tuberías, y entre tuberías y válvulas son bridadas lo que permite que toda la estructura sea de característica modular y fácilmente adaptable a distintas configuraciones de montaje y ensayo.

En todo el banco de Ensayos encontramos válvulas tipo esclusas, mariposas y globo aptas para la presión de trabajo nominal del banco. Las válvulas tipo globo se utilizan exclusivamente, para producir la regulación de carga y flujo en la salida de cada unidad de bombeo. Las válvulas mariposas y esclusas se instalarán a lo largo de los circuitos del banco de ensayo para obtener la combinación necesaria (serie/paralelo) con las bombas y/o habilitar uno u otro sector del circuito del banco de ensayo.

En la figura 1 se puede ver un esquema en planta de los elementos principales que conforman al Banco de Ensayos y en la figura 2 una imagen actual del mismo.

2.2. Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental envuelve la medición de cuatro parámetros: la altura o presión total H_n , caudal Q , velocidad de rotación n y torque T en el eje de la turbina.

1) *Altura*: El salto o altura H_n se define con la diferencia de las energías por unidad de peso, entre la entrada y la salida de la turbina, que es la energía que absorbe la máquina. Se toman las presiones referidas al eje de la turbina ensayada y se consideran los valores de presión relativa a la atmósfera.

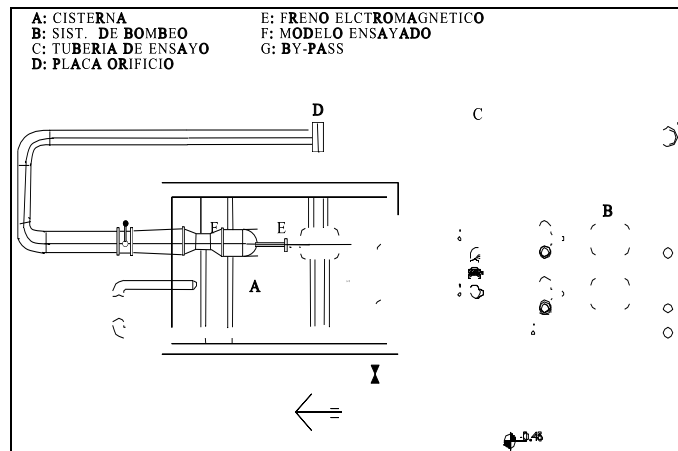


Fig.1. Banco de ensayos



Fig.2. vista del banco

En este caso la presión de salida es igual a la presión atmosférica, constituyendo una aproximación aceptable entonces:

$$H_n = \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} \quad (1)$$

Expresión que permite calcular el salto H_n con que opera la turbina ensayada.

La medición de la presión a la entrada de la turbomáquina se realiza a través de 4 tomas diametralmente opuestas a fin de poder establecer un valor uniforme, integrado y más representativo de la presión media en la sección controlada.

Respecto a la medición de la presión en la zona de baja de la turbina, se realiza a través de tomas de la sección a controlar, de la misma manera que se ha realizado para la toma de alta. Se procede a integrar y relevar un valor medio a través de cuatro tomas diametralmente opuestas.

El banco dispone de un manómetro diferencial de columna de mercurio con escala calibrada para tal fin. El rango de medición de 0 a 4000 mm Hg (figura 3 (n°1)).

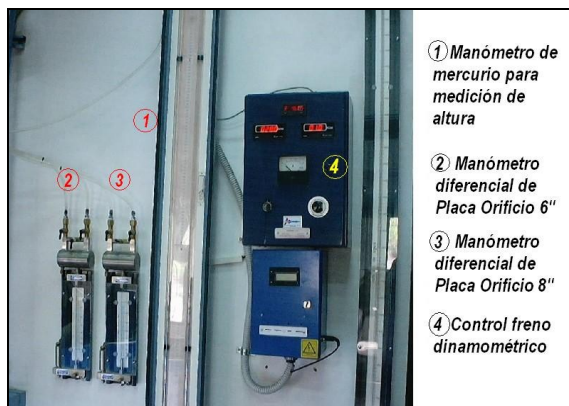


Fig.3. Dispositivos de control y medición

2) *Caudal*: El caudal Q es medido con placas orificio de diámetro 6" y 8" lo que permite calcular la velocidad v_1 en la tubería. La presión diferencial h a través de la placa orificio es medida mediante un manómetro diferencial de 200 mm Hg de escala.

Las Placas Orificio son dispositivos que consisten en una reducción en la sección de flujo de una tubería, de modo que se produzca una caída de presión, a consecuencia del aumento de velocidad.

Haciendo un balance de energía entre el orificio y la sección posterior al orificio, para un fluido incomprensible se llega a que el caudal es:

$$Q = c_0 \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \sqrt{\frac{2g(-\Delta p / \gamma)}{1 - (D_0 / D_2)^4}} \quad (1)$$

Con, D_0 : Diámetro de orificio, D_2 : Diámetro de la tubería, y c_0 : Coeficiente de orificio o coeficiente de descarga para el caudal. Este coeficiente varía entre 0.6 y 0.62 para orificios concéntricos de bordes afilados, si el Número de Reynolds es mayor de 20.000 y si la toma posterior está en la vena contracta.

Usualmente el diámetro del orificio está entre 50 y 76% del diámetro de la tubería. La toma corriente arriba debe quedar a una distancia correspondiente a un diámetro de la tubería de la cara del orificio y la de corriente abajo a una distancia de 0.5 del mismo diámetro, D_2 .

En los medidores instalados la manera más simple de obtener la caída de presión consiste en el empleo de un manómetro diferencial en "U".

Actualmente el caudal es medido con placas orificio fabricadas por Dpl. Ing. Bruno Schilig S.R.L. de diámetro 6" y diámetro 8". La presión diferencial h a través de las placas orificio es medida mediante manómetros diferenciales marca SIMPLEXACT de 200 mm Hg de escala (figura 5, 2 y 3). La medición del caudal se realiza directamente sobre la escala del manómetro. Esto permite medir aforar un caudal máximo de hasta 0,100 m³/s (100 l/s).

Los coeficientes de descarga c_0 para las placas de 6" y 8" respectivamente son:

Placa Orificio 6":

$D_2 = 152.4$ mm, $D_0 = 112.40$ mm, con $(D_0/D_2 = 0.7296)$: $c_0 = 0.5925$

Placa Orificio 8":

$D_2 = 206.37$ mm, $D_0 = 156.22$ mm, con $(D_0/D_2 = 0.7569)$: $c_0 = 0.5942$

3) *Torque*: A fin de medir la cupla mecánica T, la instalación cuenta con un freno electromagnético de 30 CV y 250-3000 r.p.m. equipado con controlador electromagnético regulable por corriente continua de 90 volts c.c. y celda de carga de 50 kg, 2mv/v y 350 ohms, ubicados en el punto de acople con la turbina.

El torque resultará del producto de la fuerza medida por la celda de carga por el brazo de palanca que existe ente la celda y el eje del freno dinamométrico (figura 4):

$$T = F \cdot d \quad (3)$$

La lectura del torque o cupla se realiza sobre el tablero de control del freno dinamométrico (figura 3) y los valores son dados en kgm.

El caudal Q es medido con placas orificio de diámetro 6" y 8" lo que permite calcular la velocidad

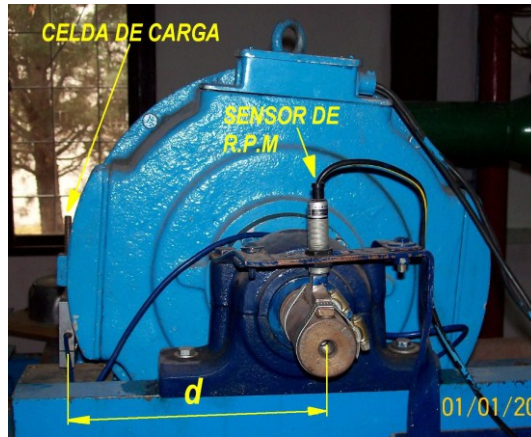


Fig.4. Vista del freno dinamométrico

4) *Velocidad de Rotación*: La velocidad de rotación de la turbomáquina se mide por medio de un taquímetro digital y leída sobre el tablero digital en r.p.m. Para eso se cuenta con un sensor inductivo de 400 mA, 10-60BDC, marca RHOMBERG –BRASLER, modelo R14-1805FNO-NTC y un taquímetro CUB5 p/uso c/DPI 24 VC marca Rk (figura 4).

5) *Potencia*: Las Potencias obtenidas del banco de ensayos pueden ser divididas en dos grupos: La potencia entregada a la turbina P_e dada por:

$$P_e = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \quad (4)$$

La potencia producida por la turbina P_p , dada por:

$$P_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{60} \quad (5)$$

6) *Variables Eléctricas*: Eventualmente se miden las potencias Activa y Reactiva mediante Amperímetros y Voltímetros Clase 1,0 y Vatímetros clase 1.0 Marca NÖLLMANN. Las magnitudes de tensión y amperaje se relevan para cada una de las fases durante la operación de la turbomáquina.

7) *Constantes*: En cuanto a las constantes utilizadas y de acuerdo con las reglas de la IEC [1] se considera: $g = 9.80665 \text{ m}^2/\text{s}$ y la densidad del agua se toma como $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, valor dentro de los rangos de la IEC 193.

3. Programa de ensayos tipo

El programa contempla la realización de ensayos de rendimiento para distintos saltos y una variación de caudales desde 0 hasta un caudal máximo determinado para cada turbina. Con esto se

logra la determinación del punto de óptimo rendimiento para cada salto, determinando además el salto nominal de la turbina.

El procedimiento en si consiste en fijar un salto (altura neta) que permanecerá constante durante todo el ensayo y se varían los caudales desde 0 hasta el valor máximo determinado. La variación se realiza cada determinados ΔQ en los cuales se toman todas las variables del ensayo (Q [l/s], n [r.p.m], T [kgm], lecturas del manómetro de Hg con las cuales se determina el salto que deberá permanecer constante).

Todos los datos se vuelcan a una planilla, en la cual se calculan los demás valores de ensayo.

4. Análisis de los Resultados Obtenidos

La performance de una turbina hidráulica es medida por su rendimiento. En general el rendimiento es una indicación de que porcentaje de la potencia entregada por el agua a la turbina es transformada en potencia mecánica en el eje, es decir:

$$\eta = \frac{P_p}{P_e} = \frac{P_p \cdot 1000}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n} \quad (6)$$

Los resultados obtenidos en el rendimiento de la turbina ensayada se presentan aquí graficados versus el Coeficiente de Velocidad Periférica μ , definido por

$$\mu = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot (2 \cdot g \cdot H_n)^{0.5}} \quad (7)$$

y versus al *Momento Unitario* definido por

$$M_{11} = \frac{P}{n \cdot D^3 \cdot H_n} \quad (8)$$

Además, se presenta la potencia unitaria P_{11} en función del caudal unitario Q_{11} a fin de confirmar la flexibilidad de operación.

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot (H_n)^{1/2}} \quad (9)$$

Siendo D el diámetro de la turbina.

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot (H_n)^{3/2}} \quad (10)$$

5. Ensayos y Resultados

A modo de ejemplo se presentan los resultados de ensayo de una turbina de flujo transversal de fabricación local (figura 5).

La máquina diseñada es una turbina de flujo transversal de un diámetro de 200 mm. Los mejores valores de rendimiento fueron obtenidos para una altura de ensayo de 13.00 m., alcanzándose valores puntuales de 78%. Se obtuvieron, además, las curvas características de la misma.

Los ensayos de rendimiento y determinación del campo de operación de la turbina fueron llevados a cabo en este banco de ensayos a fin de determinar la performance, rendimiento y campo de operación. El ensayo se realizó para un amplio rango de caudales a fin de determinar el campo de operación de la máquina.



Fig.5. turbina de flujo transversal

Se determinó el rendimiento óptimo de la turbina con su correspondiente punto de operación. Así como el campo de operación de la máquina para distintos caudales. Los resultados fueron analizados y combinados en distintos diagramas.

Los diagramas que acompañan este trabajo muestran los resultados de los ensayos realizados.

La turbina no posee distribuidor por lo que el ensayo se tomó como apertura de distribuidor, fija $A_0 = A_{0\max} = 100\%$. Los resultados obtenidos en los ensayos con salto modelo igual a 13 m y 14 m, se analizaron agrupándolos según fuera la variable o parámetro cuyo estudio de detalle quisiera realizarse (figuras 6 y 7).

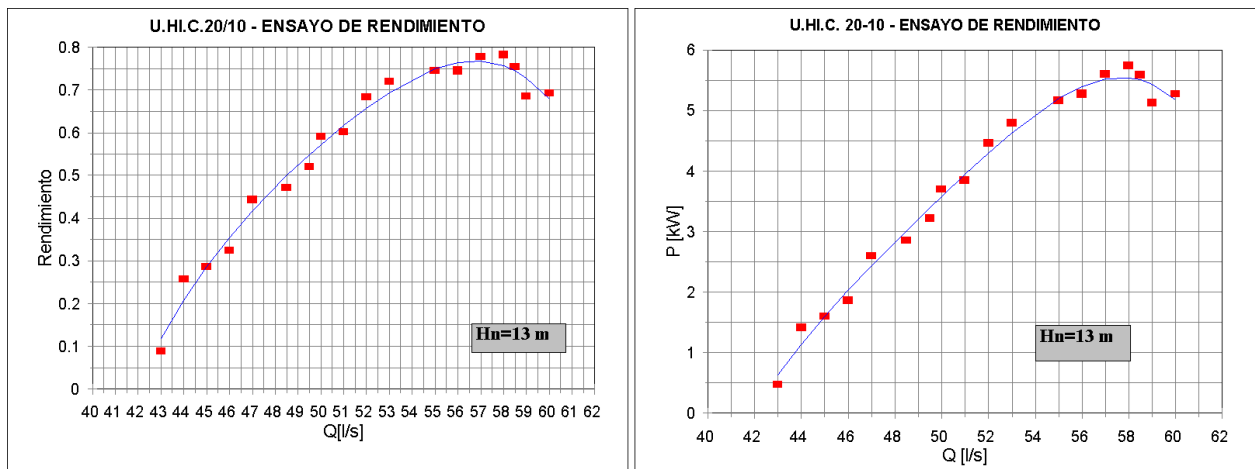


Fig.6. curva de rendimientos y potencias para salto de 13 m

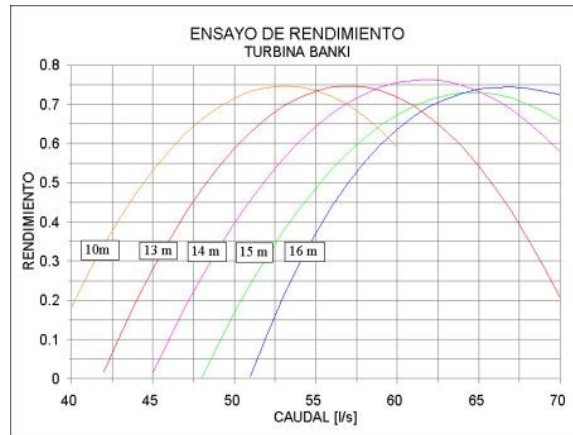


Fig.7. curvas de rendimientos para diferentes saltos.

6. Ensayos de conjunto completo

Se pueden realizar además ensayos de conjunto completo con turbina, generador y regulación de frecuencia incluida como se aprecia en la figura 8.



Fig.8. Vista de grupo turbina-generador y vista banco de resistencias y medición

A fin de tener un panorama general de comportamiento del conjunto turbina-generador, el ensayo se realizó midiendo la potencia eléctrica generada, utilizando lámparas incandescentes como carga, y adaptando las mediciones a este conjunto.

En el diagrama en bloque de la figura 9, se representan las magnitudes en juego para el sistema bajo ensayo.

Con el valor medido del caudal y altura, es posible determinar la potencia hidráulica Ph . Mientras que, con la intensidad de corriente y tensión generada, se determina la potencia generada Pg . Relacionando ambas potencias, se halla el rendimiento del sistema.

La velocidad de rotación se compara con el valor de la frecuencia generada, con el fin de establecer el punto de trabajo de la máquina.

El rendimiento del grupo turbogenerador, se obtiene relacionando la potencia de entrada al sistema (potencia hidráulica) Ph , respecto a la potencia de salida (potencia eléctrica generada) Pg , conforme se indica en la fig. 10 y la ec. 11.

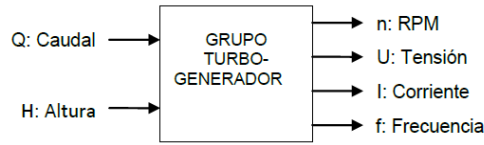


Fig.9. Diagrama en bloque de las variables a medir.

$$\eta = \frac{P_g}{P_h} \quad (11)$$

Donde: η = Rendimiento del sistema turbogenerador, P_h = Potencia de entrada al sistema (potencia hidráulica), P_g = Potencia de salida (potencia eléctrica generada).

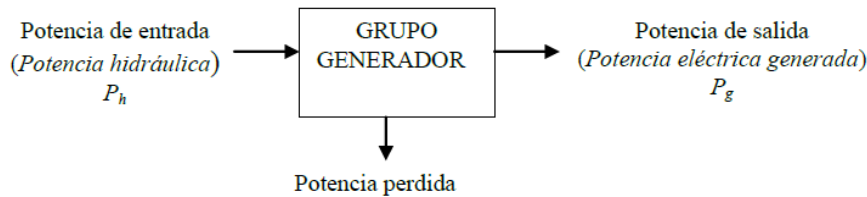


Fig.10. Rendimiento del sistema.

Estos ensayos también se llevan a cabo también para obtener, por ejemplo, las características de operación de los motores síncronos cuando son utilizados como generadores.

7. Conclusiones

Los ensayos de laboratorio permiten actualizar las técnicas de Máquinas hidráulicas y desarrollar nuevos métodos computacionales, o mejorar sus conocimientos de los fenómenos físicos tal como cavitación, flujo no permanente, etc., pero considerando los altos costos de estos ensayos se hacen dificultosos para los fabricantes de pequeñas máquinas.

Debido a esto es importante que, en las tareas recepción y de investigación sobre nuevas tecnologías que involucren ensayos adopten un rol preponderante las instituciones como Universidades, en los cuales se posean los medios para llevar adelante estas tareas, y que permitan apoyar con sus desarrollos a los fabricantes de pequeñas turbinas.

Referencias

- [1] INT. ELECT. COMMISSION- Bureau Central de la Commission Electrotechnique International - Code International Concernat les Essais de Reception Sur Modele des Turbines Hydrauliques. Publication 193 – 1965.
- [2] BRITISH STANDARDS INSTITUTION - Methods for the Measurement of Fluid Flow in Pipes - B.S. 1042. Part 1. 1964.
- [3] DIN 1952 - Medida del Paso con Toberas, Diafragmas, y Toberas Venturi Normalizadas - Año 1973.