



25 SET
al
27 2019

Montevideo



II CONGRESO DE AGUA
AMBIENTE Y ENERGÍA

AUGM



Instalación de banco de ensayos para turbinas axiales

Nicolás Rodríguez^a, Ignacio Rovira^b, Rodolfo Pienika^c

^a*Facultad de Ingeniería, Uruguay, nrodriguez@fing.edu.uy*

^b*Facultad de Ingeniería, Uruguay, irovira@fing.edu.uy*

^c*Facultad de Ingeniería, Uruguay, rpienika@fing.edu.uy*

RESUMEN: En el presente documento se describe la metodología de trabajo aplicada para la construcción de un banco de ensayos en modelo de turbinas de mini y micro generación hidráulica. Primeramente se explicitan los objetivos con los que se decide llevar a cabo el diseño y construcción del mismo, enmarcado en un proyecto de investigación de ANII. Adicionalmente se realiza una descripción física del banco que incluye la de la instalación hidráulica asociada, así como la de la instalación eléctrica y de los instrumentos de medición que se utilizarán en el funcionamiento del mismo. Por último, se menciona la importante participación que podrá tener el banco de ensayos en el aprovechamiento del recurso hídrico del país, a través del estudio de la factibilidad del ensayo de las potenciales centrales de micro generación.

PALABRAS CLAVE: Micro generación, turbina, energía, renovable, hidráulica, ensayos.

1 INTRODUCCIÓN

La construcción de un banco de ensayos de turbinas axiales se enmarca en la primera fase del proyecto de investigación FSE 131297 financiado por la ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación), cuyo objetivo es impulsar el aprovechamiento de decenas de sitios en Uruguay donde puede ser factible la instalación de micro turbinas hidráulicas [1]. El proyecto busca alcanzar este objetivo mediante el diseño, fabricación e instalación de una micro turbina axial en un embalse de riego en el Dpto. de Rocha, Uruguay.

Con la imposibilidad de continuar con la explotación a gran escala del recurso hídrico (debido principalmente a los impactos socio-ambientales negativos que los mismos acarrearán), resulta imperativo analizar otras formas de explotar dicho recurso, como la mini y micro generación hidráulica, alineado al plan de desarrollo energético nacional, que busca maximizar las fuentes renovables de energía. En la gran mayoría de posibles sitios de explotación del recurso en las escalas mencionadas, las turbinas que operarían con mejores rendimientos son las turbinas de reacción del tipo axial (semejantes a las turbinas Kaplan instaladas en las cuatro centrales hidroeléctricas de Uruguay), por lo que en el presente trabajo se priorizó este tipo de turbinas. Este tipo de proyectos no han prosperado en el país debido a los elevados costos relativos a la potencia instalada, principalmente en lo que refiere a los equipos electromecánicos (para los cuales no hay hasta ahora una oferta en el mercado nacional). El costo elevado más notorio es el de la turbina, la

cual es diseñada por la mayoría de los fabricantes mundiales, como una turbina Kaplan grande a escala reducida, incorporando elementos que no son necesarios en los micro y mini aprovechamientos. En particular, en el proyecto de investigación, se propone evitar los elementos de regulación de las turbinas Kaplan, por lo que se enfocó en el diseño de turbinas de palas fijas (llamadas de “hélice”) en instalación tipo “S” de eje horizontal [2]. Resulta necesario el desarrollo de las capacidades ingenieriles del país, para poder ofrecer turbinas diseñadas y fabricadas en plaza a bajo costo.

Por dicho motivo, es importante contar con un banco de ensayos para la verificación de las turbinas diseñadas para ser instaladas en nuevas mini centrales hidroeléctricas. Se aprovechó la existencia en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), de una instalación hidráulica (en circuito cerrado) de alimentación por bombeo de un canal sedimentológico (cuyo trazado se encuentra en su mayor parte a cota 4m con respecto a la superficie libre del pozo de toma de la bomba). Se realizaron modificaciones a la instalación pre-existente para adaptarla a las necesidades del banco de ensayos de micro turbinas axiales. En particular, se podrán ensayar modelos o pequeños prototipos de turbinas axiales tipo “S” de eje horizontal o inclinado, pero con leves adaptaciones pueden ensayarse también turbinas axiales de eje vertical con cámara espiral.

Como objetivo colateral de la creación del banco de ensayos, se buscará analizar la factibilidad del uso de diferentes materiales en la fabricación de turbomáquinas.

El banco de ensayos para turbinas axiales será instalado en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Se utilizan varios criterios para delimitar los rangos de funcionamiento aceptables del banco de ensayos. Los elementos críticos en ese aspecto son la capacidad de desagüe del banco y las capacidades de la bomba, manifestadas en su curva característica. Se toma la carga máxima que entrega la bomba como límite ya que a caudales bajos la pérdida de carga es despreciable. La modificación del primero permite la ampliación del rango de caudales (dentro del funcionamiento posible de la bomba). Por otro lado, se establecen rangos aceptables de variables del modelo que quedan determinados por el funcionamiento estable de la bomba. Se definen entonces los siguientes límites de carga máxima en turbina de $22mca$ y caudal máximo de $130 l/s$.

Para extrapolar a variables del prototipo es necesario conocer las características de cada emprendimiento (salto y caudal). Otra magnitud que debe verificarse es la velocidad específica, que debe ser mayor a un determinado valor para tratarse de máquinas axiales. El embalse de riego para el cual se diseñó el banco de ensayos en primer lugar, ubicado en el Dpto. de Rocha, Uruguay, posee un caudal y salto bruto de diseño de $1,8 m^3/s$ y $4m$, respectivamente.

2 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL BANCO DE ENSAYOS

2.1 Sistema de bombeo

El banco cuenta con una bomba centrífuga sumergible (Flygt NP 3202 LT 3~ 610) que hace circular agua proveniente del depósito pluvial por la instalación hidráulica existente.

La bomba es capaz de otorgar el caudal y presión exigidos por el rango de puntos de funcionamiento de interés, obtenido a partir del rango de trabajo en el prototipo (el cual está determinado por su diseño y por su instalación) y las leyes de similitud.

Para controlar el funcionamiento de la bomba se hace uso de un variador de frecuencia Danfoss VLT Aqua Drive FC 200 y una válvula esclusa, mediante los cuales se obtienen varios puntos de funcionamiento, resultando en la determinación de las curvas características potencia-caudal y rendimiento-caudal de la turbina sujeta al ensayo.

2.2 Instalación hidráulica

Como ya se mencionó, a la instalación hidráulica pre-existente se le realizaron las modificaciones y extensiones necesarias para modelar la instalación hidráulica del banco de ensayos correctamente a partir de la similar correspondiente al prototipo.

Como fue mencionado, la turbina axial diseñada en el marco del proyecto de investigación ANII FSE 131297, es una turbina tipo “S” de eje horizontal.

Para la parte del banco de ensayos se diseñó un cambio de dirección con forma “S” a escala, donde se colocó el eje centrado en la sección de salida y se montó el rotor sobre el mismo. El distribuidor se colocó sobre un tubo fijo concéntrico al eje, el cual fue diseñado para facilitar el método de ingreso del eje a la pieza “S”. El diámetro interior de la curva “S” es de 234 milímetros. Esto constituye otra limitación del banco de ensayos ya que los modelos que se quieran ensayar en el mismo, deben estar dimensionados acorde a la dimensión de la pieza, considerando una luz razonable entre el rotor y la misma.

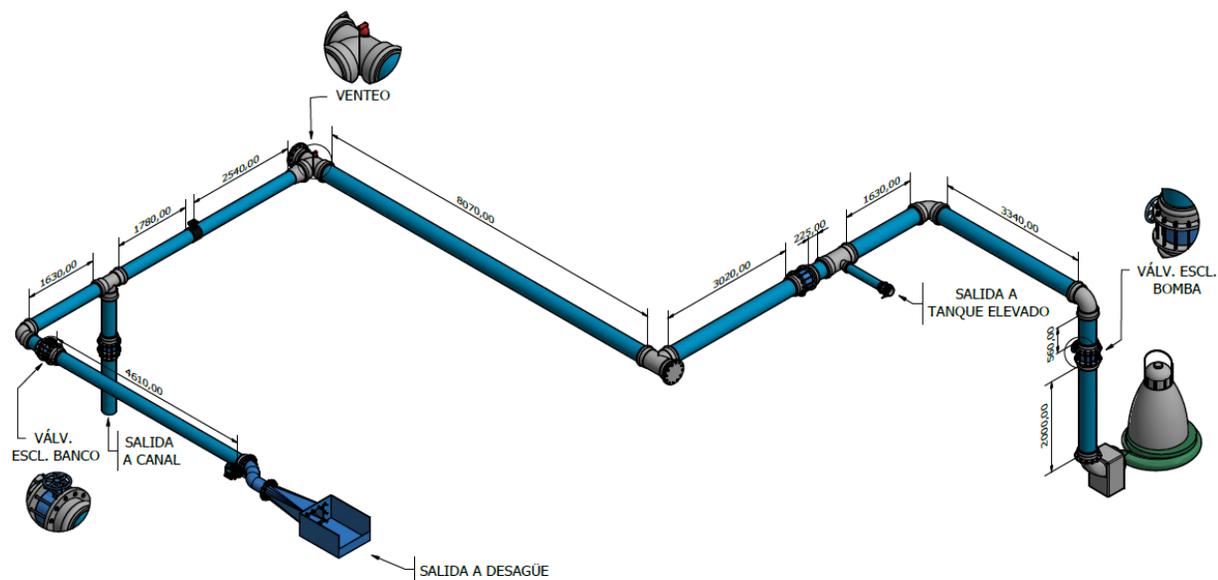


Figura 1 - Instalación hidráulica

La parte de la instalación hidráulica entre la bomba sumergible y la curva “S” es de PVC, a excepción de las válvulas que la misma requiere, las cuales son de acero. Las mismas se pueden observar en la Figura 1, siendo de especial importancia la de tipo esclusa inmediatamente anterior al caño largo bridado a la curva “S”, debido a la probable necesidad de aislar la instalación del banco de ensayo de modelos de turbinas hidráulicas para poder trabajar con los otros usos que se le da a la instalación hidráulica de la bomba sumergible.

Luego de la pieza “S”, que contiene el rotor y distribuidor, se colocó el tubo difusor también diseñado a escala y fabricado de acero. El mismo tiene una sección inicial circular y una sección final rectangular. El área de pasaje de la sección de ingreso al mismo es de $0,043 \text{ m}^2$, mientras que el área de pasaje a la salida es $0,1205 \text{ m}^2$. Es importante destacar que las consideraciones acerca del diseño del mismo se hicieron según la instalación hidráulica del prototipo y luego se realizó el diseño correspondiente a la instalación del modelo a partir de las leyes de similitud. Como es usual en el diseño de tubos difusores, se busca un compromiso entre la recuperación de presión mediante la atenuación del término cinético y un equilibrio en las pérdidas de carga que el mismo induce para poder controlar el fenómeno de la cavitación. El cálculo de las pérdidas de carga en el mismo se realizó mediante métodos empíricos [3].

Por último, se colocó un tanque de descarga de acero diseñado de forma tal de poder garantizar la sumergencia necesaria para respetar las condiciones de descarga del prototipo. La cara del tanque opuesta a la descarga del difusor se diseñó con forma de vertedero rectangular de altura regulable (para simular condiciones de cavitación). Luego de dicho vertedero, el agua es conducida hacia un reservorio de hormigón y posteriormente a un desagüe. Se tuvo en consideración que dicho desagüe sea lo suficientemente grande para desagotar el flujo para los distintos caudales que la bomba es capaz de entregar en las condiciones de ensayos de turbinas.

El tramo de la instalación correspondiente propiamente al banco de ensayos de turbinas hidráulicas, es decir, el tramo a partir de la válvula esclusa (válv. escl. banco en Figura 1), se montó sobre un modelo de calle de hormigón y boca de tormenta (que fue reutilizada, ya que era utilizada con otra finalidad para actividades del instituto). Esto facilitó no solo otorgar un buen espacio de trabajo para la realización de los ensayos, sino la instalación y soporte de las distintas partes de la misma, tanto por no tener que bajar el nivel del banco con respecto al resto de la instalación como por no tener la necesidad de fijar los soportes de la instalación al techo.

3 INSTALACIÓN ELÉCTRICA DEL BANCO DE ENSAYOS

Para describir la instalación eléctrica del banco de ensayo de turbinas hidráulicas, es relevante distinguir entre dos modos de funcionamiento del mismo; conectado a la red de distribución de energía eléctrica de UTE y aislado de la red. Ambos modos implican la utilización de un generador eléctrico acoplado al eje. En este caso se decide utilizar un motor asíncrono de 1HP y 8 polos, funcionando como generador, seleccionado a partir de valores calculados de potencia generada por el modelo y disponibilidad de utilizar una máquina asíncrona como generador, sin necesidad de utilizar un sistema de transmisión de correas y poleas o un variador de frecuencia. Se debe considerar que el caudal del punto de funcionamiento homólogo al del prototipo no supere el límite de caudal máximo proporcionado por la capacidad de desagüe de la instalación.

En el modo de funcionamiento del generador conectado a la red eléctrica, no resulta relevante tener especial cuidado en la variación del voltaje y frecuencia de la máquina eléctrica ya que ambos valores son fijados por la red en valores constantes.

En el modo de funcionamiento aislado de la red, es precisamente relevante no solo minimizar la variación de voltaje y frecuencia de funcionamiento de la máquina eléctrica sino también lograr la excitación necesaria para que el generador asíncrono pueda generar energía con normalidad. Dichas funciones las cumple un banco de capacitores conectado en paralelo, correctamente dimensionado y en lo posible de capacitancia variable, que es capaz de lograr la excitación requerida por el generador para funcionar con normalidad para distintos valores de carga [5].

Por otro lado, también es de interés la disipación de la energía eléctrica generada en el modo de funcionamiento aislado de la red. Al ser relativamente poca energía a disipar, es posible hacerlo con un banco de resistencias disipando en aire ambiente. Si fuera mayor la cantidad de energía a disipar, como el caso del prototipo, sería razonable considerar otras opciones como podría ser colocar uno o más bancos de resistencias en agua.

4 MEDICIÓN DE MAGNITUDES

El objetivo principal del banco de ensayos construido es evaluar el desempeño de diferentes tipos de turbinas axiales de tipo “S”, por lo cual surge la necesidad de medir las diferentes magnitudes físicas que permiten dicha caracterización, entre las cuales se destacan el caudal, la presión a la entrada y a la salida de la turbina, la diferencia de potencial en bornes del generador, intensidad de

corriente por el mismo, frecuencia eléctrica, factor de potencia, velocidad de giro del generador y par ejercido por la turbina, sin perjuicio de la posibilidad de medir otras magnitudes que resulten relevantes para diferentes objetos de estudio.

4.1 Medición de magnitudes eléctricas

La medición de todas las magnitudes eléctricas involucradas en el estudio se realiza mediante un analizador de red (marca Chauvin Arnoux – AEMC, modelo 8333), el cual proporciona datos de corriente, frecuencia, factor de potencia, voltaje, potencia generada, energía activa y reactiva, así como otras variables eléctricas involucradas que no resultan esenciales para el análisis primario. El mismo tiene las siguientes precisiones:

- $\pm(0,5\% \text{lectura} + 200\text{mV})$ para la medida de voltaje
- $\pm(0,5\% \text{lectura} + 2\text{mA})$ para la medida de corriente utilizando las pinzas tipo MN193 de capacidad de 5A
- $\pm(0,5\% \text{lectura} + 20\text{mA})$ para la medida de corriente utilizando las pinzas tipo MN193 de capacidad de 100A
- $\pm 1,5\%$ lectura para la medida de potencia
- $\pm 1^\circ$ para la medida de ϕ
- $\pm 1\%$ lectura para las medidas de energía activa y reactiva
- $\pm 0,01\text{Hz}$ para la medida de frecuencia

4.2 Medición de par y velocidad de giro

Se realiza mediante un torquímetro marca *Interface Force* y modelo *T25-20-F3A* (capacidad de 20Nm), de precisión $\pm 0,1\% \text{FS}$, acoplado al motor y al eje mediante acoples flexibles, que proporciona los valores de las magnitudes mencionadas.

4.3 Medición de caudal

Se realiza a través del uso de un caudalímetro ultrasónico no intrusivo marca *General Electric* y modelo *TransPort PT878*, de capacidad 12m/s y precisión $\pm(1-2\% \text{lectura})$, acoplado al caño de PVC precedente a la turbina y debidamente calibrado y ajustado para la medición en el material y espesor correspondiente al punto de medida.

La instalación cuenta con un caudalímetro electromagnético en un tramo de caño previo al banco de ensayos, lo que permite comparar las mediciones obtenidas por el instrumento anterior.

4.4 Medición de presión

Es necesario obtener valores de presión estática aguas arriba y abajo de la turbina, de modo que se puedan obtener datos reales de la carga que la misma obtiene del flujo. La medición de presión aguas abajo de la turbina se realiza directamente mediante un limnómetro ubicado en el tanque, el cual mide la cota de la superficie libre del mismo.

Asimismo, para obtener la presión aguas arriba de la turbina se refiere a la norma IEC 60193:2019: Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests [4]. De acuerdo a la misma, se colocan 4 tomas de presión perpendiculares entre sí en una sección precedente a la turbina. Si bien la sección no es la inmediatamente precedente a la misma, se puede realizar el ajuste correspondiente de pérdida de carga utilizando las formulaciones de Darcy-Weisbach, utilizando las propiedades de rugosidad del PVC. Dichas tomas de presión están

conectadas mediante un aro colector, estando el mismo conectado a un transductor de presión marca *Nuova Fima* y modelo *ST2*, de rango [0,0.1bar] y precisión $\pm 0,35\%$ FS.

5 CONCLUSIONES

En el marco del cambio de la matriz energética nacional y en el afán de continuar explotando el recurso hídrico del país, se ha construido un banco de ensayos de turbinas axiales, que servirá para continuar el estudio de la factibilidad de las centrales de micro generación. Adicionalmente, el banco de ensayos podrá ser utilizado con fines académicos y de enseñanza en cursos que el instituto dicta.

Mediante el uso de la instalación construida, se podrá evaluar el funcionamiento de las diferentes turbomáquinas diseñadas mediante la construcción de curvas de funcionamiento, siendo las más relevantes las de carga vs. caudal, potencia eléctrica vs. caudal y rendimiento vs. caudal, así como entender y optimizar el funcionamiento y ajuste de los parámetros eléctricos para el funcionamiento de una turbina hidroeléctrica funcionando aislada de la red, cuyo elemento fundamental son los bancos de capacitores de excitación del generador.

De todo lo anterior se concluye que la instalación construida ampliará el patrimonio con el que la Facultad, y más concretamente el Instituto, cuenta para desarrollar tareas de investigación y desarrollo, extensión y enseñanza.

6 AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación, cuyo financiamiento colaboró con la materialización del proyecto. Asimismo corresponde agradecerle a los docentes Dr. Ing. José Cataldo, Dr. Ing. Alejandro Gutierrez y Tec. Pablo Pais por el apoyo técnico brindado a lo largo de la realización de los trabajos. Por último, es preciso agradecerle a Msc. Ing. Laura Rovira por su apoyo en el conocimiento de la instalación hidráulica preexistente.

7 REFERENCIAS

- [1] Terra, R. and Schenzer, D. and De Vera, A. (2013). Factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas multipropósito en presas ya construidas. IMFIA-Facultad de Ingeniería para Banco Interamericano de Desarrollo (BID) – Fundación Julio Ricaldoni (FJR). Recuperado de https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/factibilidad_pch_multiproposito_en_presas_existentes.pdf
- [2] ESHA (2006). Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. European Small Hydropower Association. Recuperado de http://portal2014-2018.cnr.gob.cl/Home/Documentacin%20Complementaria/GUIA_Layman_ESHA_PCH.pdf
- [3] Idel'Chik, I. (2008). Handbook of hydraulic resistance. 4ª ed., Redding, CT: Begell House.
- [4] IEC. (2019). Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests. 60193:2019. IEC.
- [5] Smith, N. (2008). Motors as generators for Micro-Hydro Power. 2ª ed., Practical Action Publishing Ltd..