

Diseño de un banco de ensayo para turbinas Michell Banki emplazado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Oberá

Daniel Sanchez Alexis Nahir ^a, González Santiago Ezequiel ^a, Mattivi Federico Manuel ^{a*}, Oliveira Mario Orlando ^a, Puertaz Martín ^a

^a *Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: alexis.nahir82@gmail.com, santiago13102000@gmail.com, fmmattivi@outlook.com, mario.oliveira@fio.unam.edu.ar, puertazmartin@gmail.com .

Resumen

El presente proyecto consiste en el diseño de un banco de ensayos ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería lo cual representaría una oportunidad para la investigación y el desarrollo del comportamiento de los micro aprovechamientos hidráulicos, con un carácter de utilidad por sobre la rentabilidad. Por otro lado, en términos educativos ofrecería una experiencia de estudio enriquecedora tanto para alumnos como investigadores. El proyecto se llevará a cabo mediante la evaluación de factibilidades técnicas, económicas, legales y ambientales.

Palabras Clave – *Hidráulica, Investigación, Michell Banki.*

1. Introducción

Se plantea el diseño de un grupo turbogenerador en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería con fines educativos y/o de investigación, utilizando dos turbinas Michell-Banki, donde una de ellas está acoplada a una máquina síncrona y la otra a una asíncrona, ambas actuando como generadores. El proyecto actualmente cuenta con infraestructura edilicia ya existente. El sistema inicia con una bomba que transfiere el agua al tanque superior, en dos tuberías, cada una equipada con sus respectivas válvulas, las cuales permiten el flujo controlado y descienden posteriormente por las tuberías conectadas a las turbinas mencionadas previamente, depositando nuevamente el agua en el tanque inferior.

La primera etapa del proyecto se centra en obtener los parámetros de diseño de la turbina adecuada para las instalaciones de conducción ya disponibles y la evaluación del sistema de transmisión. Esto incluye el relevamiento de las instalaciones para lograr una conducción eficiente y razonable respeto a las posibilidades técnicas de elaboración.

La segunda etapa de proyecto se centra en seleccionar los distintos componentes eléctricos como ser: los generadores, componentes de medición, protección y control necesarios para llevar a cabo los ensayos de interés en el presente proyecto.

2. Desarrollo

La obra civil que se puede observar en la Fig. 1 consta de los sistemas de conducción para los respectivos grupos de generación, donde la conducción cuenta con tres válvulas reguladoras de caudal de cierre lento que serán utilizadas para el montaje y pruebas hidráulicas seleccionadas en la

*fmmattivi@outlook.com¹

instalación, así como también el de la regulación de caudal tanto a la entrada como a la salida del mismo.

Es importante denotar que el desagote de la turbina no se hace directamente a la atmosfera como es común en este tipo de turbinas. Las turbinas de flujo cruzado o Mitchell Banki se caracterizan por ser máquinas de acción tanto como reacción por lo que transfieren a su rodete tanto la energía cinética del fluido como la presión estática del mismo. En la mayoría de los casos el grado de reacción es pequeño y/o despreciable [1]. Pero en la distribución mostrada en la Fig. 4. se tiene alrededor de 1,67 [m] de desagote, lo que proporciona una carga adicional al sistema. También es interesante dicha disposición en materia de recaudar datos y evaluar ensayos que resultarán enriquecedores por la poca información disponible al respecto.

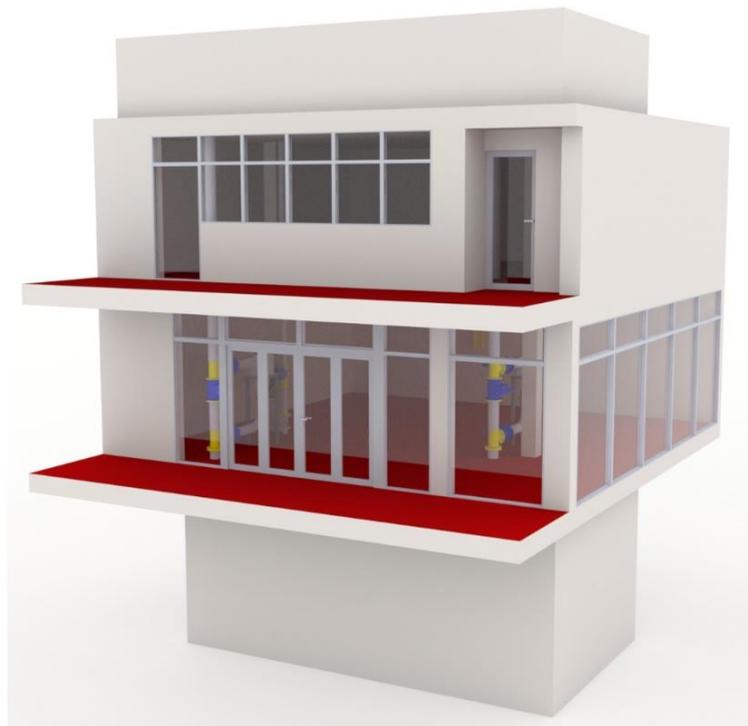


Fig. 1 - Render en perspectiva del Laboratorio. (Fuente: elaboración propia)

La Fig. 2 muestra una vista lateral del Laboratorio donde se pueden observar sus componentes principales. El flujo del agua desde la cisterna superior pasa a través de la turbina Michell Banki, lo que permite que la turbina gire y, a su vez, impulse el generador eléctrico para producir la energía eléctrica. Luego, el agua puede ser almacenada nuevamente en la cisterna inferior para realizar el ciclo de recirculación.

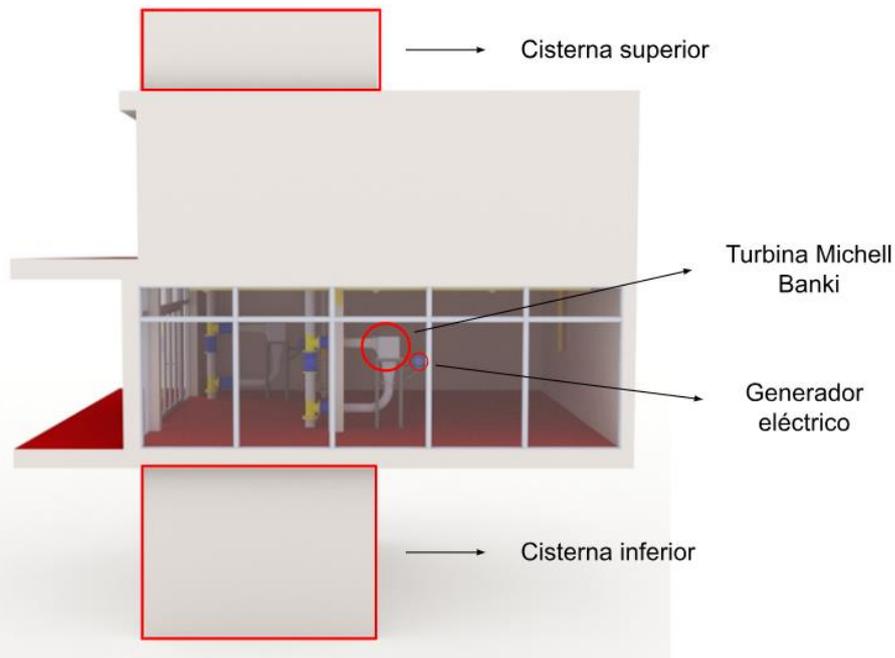


Fig. 2 - Render de componentes principales del Laboratorio. (Fuente: elaboración propia)

En la Fig. 3 se muestran las partes importantes del sistema de generación hidráulica. Las válvulas permiten controlar el flujo de agua, la turbina Michell-Banki convierte la energía hidráulica en energía mecánica y el generador transforma esta energía mecánica en electricidad, a su vez, todo el sistema está integrado para aprovechar la energía del agua de manera eficiente.

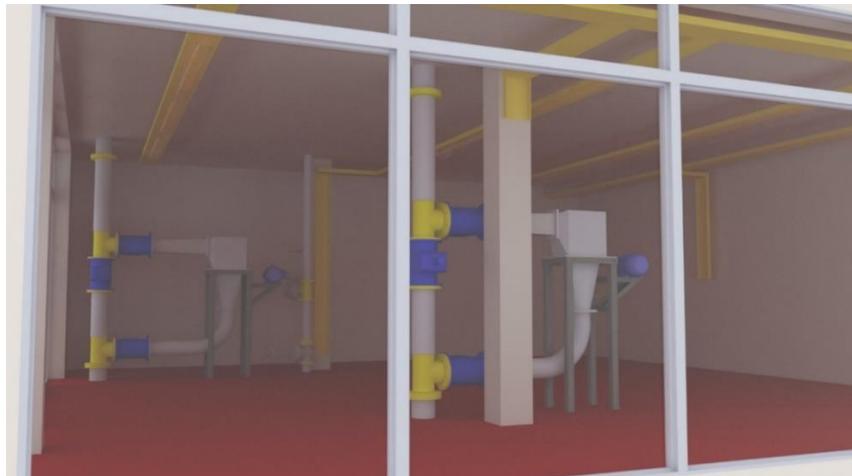


Fig. 3 – Render del interior del Laboratorio. (Fuente: elaboración propia)

2.1. Determinación de la potencia neta disponible

Dado que la potencia hidráulica se define como:

$$P_h = \gamma * Q * h \quad (1)$$

donde: γ es el peso específico, Q es el caudal y h es la altura.

Conociendo las dimensiones de la instalación, se determina $h_0 = 7,2 [m]$, donde h_0 es la altura medida desde el nivel del agua en la cisterna superior a la descarga en la cisterna inferior. Posteriormente, para conocer el caudal se procede a plantear Bernoulli para un caso ideal [11]:

$$h_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{p_2}{\rho} = h_0 + \frac{v_0^2}{2 * g} + \frac{p_0}{\rho * g} \quad (2)$$

donde: h es la altura, v es la velocidad del fluido, p es la presión parcial del fluido, g es la aceleración de la gravedad y ρ es la densidad del fluido.

Tomando como referencia $h = 0$ la salida a la cisterna inferior:

$$\frac{v_0^2}{2 * g} = h_2 \rightarrow v_0 = \sqrt{h_2 * 2 * g} \quad (3)$$

donde: h es la altura, v es la velocidad del fluido y g es la aceleración de la gravedad.

Conociendo la velocidad, es posible determinar el caudal:

$$Q = v_0 * A_0 = \sqrt{2 * 7,2 [m] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right]} * \pi * \frac{(0,152[m])^2}{4} = 0,215 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (4)$$

donde: v_0 es la velocidad del fluido en el punto 0 y A_0 es el área de la conducción.

Por continuidad:

$$Q = v_1 * A_1 = v_0 * A_0 \quad (5)$$

donde: v es la velocidad del fluido en el punto 0 y A es el área de la conducción

donde: A_1 es la sección en la garganta de entrada de la turbina.

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0,215 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{35 [pulg^2] * \frac{(0,0254[m])^2}{1[pulg^2]}} = 9,52 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

donde: Q es el caudal y A_1 es el área de la conducción en el punto 1.

La cual podemos aproximar a la velocidad de entrada al rodete de la turbina que en el presente texto se llamara como:

$$c_1 = 9,52 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Del mismo modo se define al caudal máximo como:

$$Q_M = 0,215 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

La altura nominal:

$$h_N = 5[m]$$

Por lo tanto, la potencia hidráulica neta resulta:

$$P_h = \gamma * Q_{MN} * h_N = 9800 \left[\frac{N}{m^3} \right] * 0,215 \left[\frac{m^3}{s} \right] * 5 [m] = 10,53 [kW] \quad (7)$$

donde: h es la altura, Q es el caudal del fluido y h_N es la altura neta.

Cabe resaltar que debido a las características de la instalación las pérdidas hidráulicas resultan despreciables. En la Fig. 4 se puede observar un esquema de la conducción del aprovechamiento hidráulico.

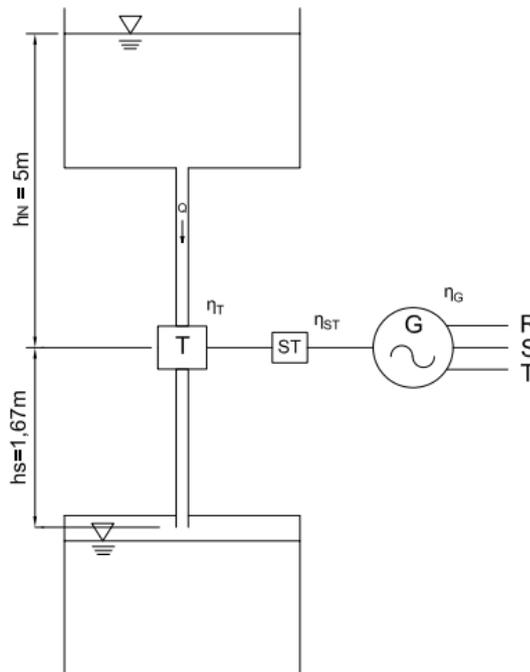


Fig. 4 - Esquema de la conducción. (Fuente: Elaboración propia)

2.2. Diseño mecánico y selección de la turbina

En esta primera etapa se puede corroborar que la turbina adecuada de acuerdo con datos estadísticos de diversos aprovechamientos hidráulicos es la turbina Michell Banki. Con los datos de caudal y altura disponibles en la entrada de la turbina y expuestos en la sección anterior se puede ingresar al diagrama de selección de turbinas hidráulicas de la Fig. 5.

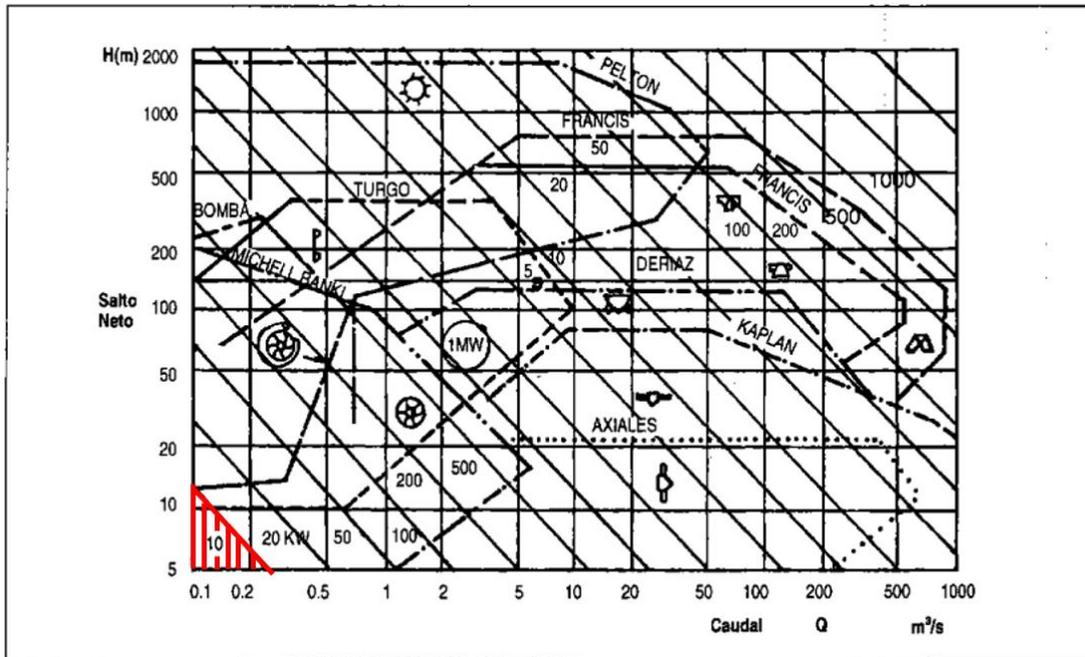


Fig. 5 - Diagrama de selección de turbinas hidráulicas. (Fuente: Micro-Hidroeléctrica tipo Michell Banki [4])

Para el diseño de turbinas generalmente se requiere de la resolución de un problema de varias etapas, que no puede ser afrontado totalmente de forma matemática, más bien mediante la utilización de modelos. Sin embargo, el objetivo de esta sección es el dimensionamiento de acuerdo a los parámetros de la instalación, llegando finalmente a la determinación de los parámetros que se pueden observar en la Fig. 6 y que a su vez se resumen en la Tabla 1.

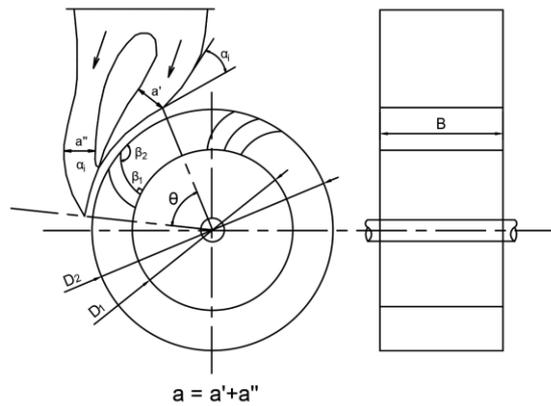


Fig. 6 - Parámetros geométricos de la turbina. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 1 - Parámetros mecánicos de la turbina

Velocidad del rodete "N" [rpm]	436
Caudal máximo "Q" [m ³ /s]	0,215
Altura Nominal "Hn" [m]	5
Velocidad del chorro "c" [m/s]	9,04
Diámetro exterior "De" [m]	0,2
Diámetro interior "Di" [m]	0,132
Espesor "B" [m]	0,396
Espesor del chorro "a" [m]	0,06
Arco de admisión "tita" [°]	120
Coefficiente de forma [ka]	0,289
Número de álabes "Z"	23
Ángulo del inyector "alpha" [°]	16
Velocidad específica de caudal "Nq" [rpm]	60,5
Velocidad específica de potencia "Ns" [rpm]	183,2
Velocidad de embalamiento "Ne" [rpm]	741,26
Potencia en el eje de la turbina [kW]	7,371

2.3. Sistema de transmisión de potencia

Para realizar la transmisión de potencia entre la turbina Michell Banki y el generador eléctrico se utilizará un sistema de correa-polea. Esta configuración permitirá una transferencia eficiente de energía mecánica desde la turbina hacia el generador, asegurando así un funcionamiento óptimo del sistema de generación eléctrica. La disposición del sistema de transmisión se observa en la Fig. 7. Los resultados del proceso de selección de las correas y poleas se resumen a continuación en la Tabla 2.

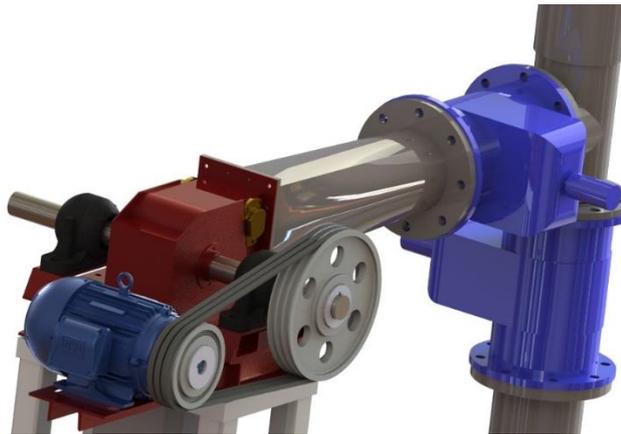


Fig. 7 - Render sistema de transmisión. (Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 2 - Parámetros del sistema de transmisión de potencia turbina-generador eléctrico

Velocidad generador N_g [rpm]	1500
Velocidad generador N_t [rpm]	436
Relación de velocidad i	3,44
Potencia en el eje de la turbina P_{eje} [kW]	7,37
Diámetro polea del generador D_g [mm]	125
Diámetro polea del generador D_t [mm]	430,01
Factor de servicio $C2$	1,4
Potencia de diseño P_d [kW]	10,32
Distancia entre centros máxima D_{max} [mm]	1110,03
Distancia entre centros mínima D_{min} [mm]	388,51
Distancia entre centros preliminar D_{cp} [mm]	466,21
Longitud de la correa L_d [mm]	1853,68
Distancia entre centros seleccionada D_{cs} [mm]	687,24
Potencia nominal por correa [kW]	5,19
Potencia adicional por relación de velocidad [kW]	0,69
Capacidad nominal básica por correa P_b [kW]	5,88
Factor de corrección $C1$	0,95
Factor de corrección $C3$	0,82
Calificación de potencia de la correa P_c	4,64
Número de correas N_c	2,22
MIA [mm]	45
MTA [mm]	30
D_{cmin}	642,23
D_{cmax}	717,23
Diámetro polea seleccionada D_g [pulg]	4,92
Diámetro de volante seleccionado D_t [pulg]	16,93

2.4. Normativa legal aplicable al proyecto

A continuación, se realizará un análisis de la normativa aplicable al proyecto, la cual se divide principalmente en normativa Nacional y Provincial.

- a) Ley 27424 - Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública: promulgada con el propósito de impulsar la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables, tales como la solar, eólica, hidroeléctrica de pequeña escala, biomasa, entre otras, y su integración a la red eléctrica pública en Argentina.
- b) Ley 19587 - Higiene y seguridad en el trabajo: la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo es un marco legal que establece las normas y regulaciones necesarias para garantizar la seguridad, salud y bienestar de los trabajadores en sus ambientes laborales.
- c) Ley XVI N°118 - Balance neto y generación distribuida: la generación distribuida es la producción de energía eléctrica en nuestras casas, comercios e industrias mediante fuentes de energía renovables. Mediante el aprovechamiento de la energía renovable es posible cubrir parte de la energía eléctrica que consumimos en nuestro inmueble y además inyectar el eventual excedente a la red de nuestra distribuidora. De esa manera se genera un balance neto por la energía inyectada.
- d) Norma ISO 31000 - Gestión de riesgos: proporciona un marco integral para la gestión del riesgo en cualquier organización, estableciendo los procesos y procedimientos necesarios para identificar, evaluar y gestionar los riesgos de manera efectiva.
- e) Norma AEA 90364 - Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles: reglamentación establecida por la Asociación Electrotécnica Argentina en conjunto con el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) que se aplica para el dimensionamiento y ejecución de instalaciones eléctricas
- f) Procedimientos para la programación de la operación, el despacho de cargas y el cálculo de precios de Cammesa:
 - P.T. 4: ingreso de nuevos grandes usuarios mayores, distribuidores, generadores, autogeneradores y cogeneradores al MEM.
 - P.T. 5: control de tensión y potencia reactiva.
 - P.T. 9: participación de generadores en el servicio de regulación de frecuencia del MEM.

2.5. Trabajos futuros

Dado que el presente artículo es un avance del desarrollo del proyecto final de la carrera Ingeniería Electromecánica correspondiente a la asignatura Proyecto Electromecánico II, el cual tiene una duración de un (1) año, aún quedan tareas por realizar para la culminación del mismo, algunas de las cuales se presentan a continuación:

- a) Selección de generadores eléctricos junto a sus respectivos sistemas de excitación.
- b) Selección de sensores para la instrumentación tanto de la turbina como de los generadores eléctricos.
- c) Selección del sincronoscopio para lograr la puesta en paralelo del generador con la red eléctrica.
- d) Selección del banco de carga para el funcionamiento en modo aislado de la red.
- e) Selección del autómatas encargado del sistema de adquisición de datos y control del conjunto.
- f) Diseño y elaboración de planos del sistema eléctrico de potencia, mando y control.
- g) Realizar la evaluación ambiental y económica del proyecto.

3. Conclusiones

El diseño del banco de ensayos en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería representa un avance significativo tanto para la investigación en micro aprovechamientos hidráulicos como para la educación de estudiantes y la comunidad científica.

En cuanto a las estructuras edilicias, tienen un gran potencial, sin embargo, se denota que el tanque superior requiere de una modificación de manera que el mismo pueda mantener el caudal de alimentación hacia las turbinas. Por otro lado, los parámetros hidráulicos obtenidos son cálculos teóricos que surgen de idealizaciones matemáticas, es por ello que, para obtener el valor real de la potencia aprovechable, se deberán realizar ensayos.

A nivel normativo, el proyecto se alinea con las leyes y regulaciones nacionales y provinciales, promoviendo el uso de energías renovables y la seguridad en el ámbito laboral. Además, el cumplimiento de normas internacionales y locales asegurado la calidad y sostenibilidad del sistema propuesto.

4. Referencias

- [1] Adam Harvey, Micro-Hidro Design Manual, Intermediate Technology Publications, 1993.
- [2] Gestión de Riesgos, ISO 31000, Febrero 2018.
- [3] Infoleg, información legislativa, Ministerio de Justicia de la Nación.
- [4] José Vásquez, Micro-Hidroeléctrica tipo Michell Banki, Funcionamiento, Mantenimiento y componentes, 2007.
- [5] Julio Egúsquiza, Julio Sánchez, Diseño de un banco de pruebas para turbinas Michell Banki para el laboratorio energía de la Pontífica Universidad Católica del Perú, 2009.
- [6] Ley de balance neto y generación distribuida, Ley Provincial XVI N°118, Septiembre de 2016.
- [7] Ley de higiene y seguridad en el trabajo, Ley N°19.587, Publicada en 1997.
- [8] Procedimientos para la programación de la operación, el despacho de cargas y el cálculo de precios, Cammesa, Los Procedimientos Versión XXXIII.
- [9] Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública, Ley 27424.
- [10] Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles, Asociación Electrotécnica Argentina, AEA 90364, Edición 2016, 2017.
- [11] Claudio Mataix, Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas, Segunda edición, Ediciones del Castillo S. A., 1986.