

Implementación de un laboratorio para la evaluación de sistemas de generación de turbinas microhidráulicas

Juan Francisco Cedano Lezcano ^{1,*}, Agustín Escamilla Martínez ²

¹ Sistemas mecánicos Tabasco, CIATEQ, Cunduacán, Tabasco, México.

² Sistemas mecánicos, Dirección de Sistemas Mecánicos, CIATEQ, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia: juan.cedano@ciateq.mx; Tel.: (+52-993-215409)

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de noviembre de 2024

Aceptado: 15 de diciembre de 2024

Publicado: 31 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.262>

Resumen: Se describe la implementación de un laboratorio para la demostración y evaluación de turbinas microhidráulicas. La necesidad surge ya que actualmente las turbinas micro hidráulicas son poco empleadas en México siendo la principal causa, los problemas culturales en el uso de agua, la contaminación en ríos donde se podrían implementar, aunado a la falta de conocimiento de los sistemas micro y minihidráulicos, esto aun cuando el 12% de la energía generada en Mexico se genera por la energía hidráulica. El sistema implementado consiste en un circuito cerrado con depósito de 5000 litros, control de caudal, una bomba y un punto de conexión de la microturbina a probar, con generador eléctrico. El circuito instalado muestra el diseño fundamental de la conexión, la impulsión de microturbinas de 100 W del tipo Kaplan y 1200 w tipo Pelton, así como la generación de energía eléctrica de corriente alterna. El arreglo permite probar diferentes diseños de turbina comerciales y no comerciales por lo que se tiene la oportunidad de probar el rendimiento de prototipos funcionales, demostrando las bondades de la implementación de esta tecnología con relación a su costo beneficio.

Palabras clave: laboratorio, microhidráulica, turbina y energía.

Introducción

Los sistemas de generación de electricidad por medio de energía hidráulica convierten la energía cinética por el movimiento del agua o la energía potencial por cambios de altura en electricidad; dentro de dichos sistemas se encuentran los de micro generación hidráulica o micro hidroeléctricas que aprovecha pequeñas corrientes de agua y pueden producir hasta un máximo de 100 kW. Se utilizan principalmente en zonas apartadas o rurales donde no llega la red eléctrica; se trata de circuitos hidráulicos simples y microturbinas de pequeña, baja y mediana potencia, cuya energía generada es para autoconsumo en aplicaciones de impulsión de ejes de máquinas y la producción de electricidad. Los sistemas de micro generación hidráulica del tipo derivación utilizan por lo general microturbinas tipo Pelton, Turgo, Michell-Banki, Francis o de tipo axial, para convertir la energía hidráulica en energía mecánica, que luego se transforma a energía eléctrica. Dichas máquinas requieren una altura o carga hidráulica y un caudal determinado.

La turbina es una turbomáquina. El funcionamiento de las turbomáquinas se basa en la variación de la cantidad de movimiento de las partículas del fluido, producto de la interacción mecánica a la que se someten al ponerlas en contacto con los álabes de una o más ruedas en movimiento. Estas máquinas siempre tienen movimiento rotatorio, de ahí el prefijo turbo que significa giro. El elemento rotatorio de las turbinas se conoce como rodete. Las turbomáquinas pueden ser motrices si la máquina aprovecha la energía del fluido, o generatrices si la máquina suministra energía al fluido (García, 1985).

La selección de un tipo de turbina u otra estará relacionada con las características de la central. Para alturas pequeñas y caudales muy grandes se utiliza generalmente la turbina Kaplan, mientras que para caudales pequeños y alturas muy grandes se utiliza la turbina Pelton. La turbina Francis, más versátil, se ajusta para valores intermedios de altura y caudal. (Canaza Choqueluque y Chara Surco, 2018).

Las instalaciones hidroeléctricas de tamaño pequeño representan por lo tanto una importante fuente energética renovable y pueden contribuir activamente al desarrollo sustentable del lugar en el que se implantan. Tabasco cuenta con grandes recursos hidrológicos, por lo que se estima un gran potencial para la aplicación de los sistemas de microgeneración hidráulica.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas pueden aprovechar los flujos relativamente bajo de los afluentes sin necesidad de crear grandes embalses, conservando los flujos ecológicos y limitando los impactos ambientales de la ingeniería civil. También proporcionan electricidad a áreas remotas y mejoran a la población rural. (Fernandez Ortiz y Santamaria Ramos, 2023).

La promoción de las tecnologías de energías renovables ofrece una doble ventaja: diversificación energética y la esperanza de desarrollo para muchas comunidades pobres y aisladas que no están conectadas a las grandes redes de transporte y distribución eléctrica. El suministro de energía a las comunidades aisladas se concibe como soporte a las actividades productivas, domésticas y comerciales de éstas (Reyna *et al.*, 2017).

Dentro de la evaluación integral realizada por la CFE, respecto del potencial hidroeléctrico en México, no se contempla el potencial de la pequeñas, mini y micro hidroeléctricas. Esto se debe a que los potenciales estimados por CFE corresponden a proyectos con una capacidad de generación mayor a los 40 GWh/año. Sin embargo, existen algunos estudios que permiten conocer los potenciales regionales, e identificar de manera general el potencial a dichas escalas de proyecto en el país. Investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, antes Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE) identificaron, en la sierra norte de Puebla y Veracruz, un potencial estimado de 364 MW de potencia media y 61 MW de potencia instalada, con una generación media anual de más de 3,526.1 GWh/año (Rivas Carpio, 2014). Por otra parte, el estudio “Estimación del Recurso para Pequeña, Mini y Micro Hidroenergía: Aplicaciones en México” realizado para la SENER (2012) establece, de manera preliminar, que el potencial de generación de la pequeña, mini y micro hidroeléctrica es de aproximadamente 2,800 MW de potencia media, con una producción de 9.79 TWh/año, con base en referencias internacionales y del propio potencial establecido por la CFE para plantas con una generación mayor que 40 GWh/año (Irazusta, 2020). Aún no se conoce el 100 % del potencial a menor escala en México debido a que no se ha estudiado todas las zonas del país; así mismo, los estudios realizados presentan análisis a nivel general; por lo que se requiere realizar nuevos estudios contemplando evaluaciones de potencial más completos.

Ahora bien, para los sistemas de generación con microhidroeléctricas, la legislación y reglamentación tiene excepciones para permisos y/o autorización tomando como base la potencia de generación y condiciones específicas, las cuales son las siguientes: Se tiene cierta ventaja, en plantas eléctricas menores a 0.5 MW ya que no requieren autorización por parte de la CRE, no se requerirá de concesión para la explotación, uso o aprovechamiento de agua, cuando sea para generación de energía hidroeléctrica en pequeña producción o escala, entendida como tal aquella en que se aprovecha las corrientes de ríos y canales, sin desviar las aguas ni afectar su cantidad ni calidad, y cuya capacidad de generación no exceda de 30 MW. Las plantas de generación con una capacidad menor o igual a 0.5 MW, no requerirán autorización en materia de impacto ambiental, conforme el Artículo 5º. del Reglamento de la LGEEPA.

En conclusión, para sistemas de generación de energía mediante microhidroeléctricas, no se requiere permisos para generación, ni concesiones por aprovechamiento de agua, ni autorización en materia de impacto ambiental; en plantas con capacidad menor a 500 kW, siempre y cuando la generación sea para autoabastecimiento y para beneficio de comunidades aisladas sin cobertura eléctrica; y en el caso del aprovechamiento superficial, que no se desvíen las aguas ni afectar su cantidad ni calidad. No obstante, se requerirá concesión para ocupación de terrenos federales y permiso para construcción de la infraestructura necesaria para instalación del sistema, ante la CONAGUA.

Dado el potencial estimado, la baja complejidad tecnológica y los requisitos mínimos para la implementación de centrales micro hidráulicas, se consideró conveniente implementar un laboratorio para capacitación, prueba y monitoreo de microturbinas, tendientes a fortalecer el diseño e implementación de sistemas de generación eléctrica renovables, y aislados de las redes eléctricas. El Laboratorio se instaló en Cunduacán, Tabasco.

Desarrollo

El diseño inicial del laboratorio debe tener las características para disponer de las condiciones necesarias para la operación de sistemas de generación microhidráulicos considerando los principios de operación como son: altura y caudal, entre otros, además de la fabricación de una instalación sencilla y la demostración de los resultados (generación de energía).

En la Figura 1 se muestra un diagrama con los pasos para el desarrollo e integración de un laboratorio para evaluación y demostración de turbinas hidráulicas y el cual se propone en base a las características y consideraciones requeridas para la instalación de sistemas de generación microhidráulicos.

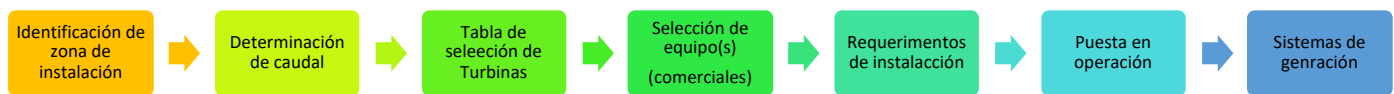


Figura 1. Diagrama de flujo de pasos para el desarrollo e integración de un laboratorio para evaluación y demostración de turbinas hidráulicas (Fuente: Elaboración propia).

Identificación de zona de instalación

La zona de instalación resulta primordial para las turbinas microhidráulicas, de manera general deben permitir su accesibilidad y así determinar la infraestructura necesaria, para la operación de los equipos, cada área requiere un trato particular destacando aspectos como: características del ambiente, espacios y accesibilidad para su instalación, además de los requisitos de la adecuación a considerar por los fabricantes de equipos y la ubicación del usuario final.

En este laboratorio se considera un área destinada dentro de las instalaciones de CIATEQ Tabasco, con dimensiones de 8 x 4 m² y se considera material de piso concreto.

Determinación de caudal

Esta etapa es determinante en todo proceso de instalación de sistemas de generación hidráulico, ya que depende de este punto el resultado esperado del potencial energético, para este requerimiento se debe conocer y estimar registros de caudal mínimo, además de las condiciones topográficas del lugar, para el laboratorio se propusieron las condiciones y espacios asignados bajo las siguientes condiciones: tanque de almacenamiento de 5000 L (altura 2.0 m y diámetro 2.38 m) para captación de agua, por lo que se realizan los cálculos para determinar un caudal mínimo con el volumen de agua, de igual manera se considera un tramo de tubo PVC (policloruro de vinilo) de 6 m de largo y diámetro 0.153 m debido a las a que la propuesta debe ser económica y práctica, la salida de las boquillas de tanque solo puede ser máximo de 3 pulgadas, en Figura 2, se muestra el arreglo propuesto para generación del caudal del sistema cerrado, el cual está formado por un tanque de 5000 L, válvula para el control de caudal, tubería de 6 pulgadas y reducción de 6x3 pulgadas, como accesorios para aumentar el caudal.

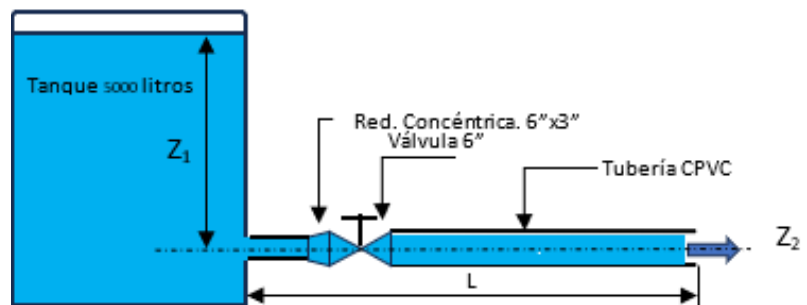


Figura 2. Arreglo propuesto de caudal (Fuente: Elaboración propia).

Con los parámetros de altura inicial de 2 m, se realiza el cálculo de velocidad de un sistema por gravedad con pérdidas por fricción (Ecuación 1 de Darcy-Weisbach), se propone un factor de fricción inicial f a 0 para iniciar el sistema.

$$Z_{1N} = \left(1 + f \frac{L}{D}\right) \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gZ_1}{1 + f \frac{L}{D}}}$$

Suponemos el factor de fricción $f=0$

$$v_2 = \sqrt{2 g Z_1} = \sqrt{2(9.81 \text{ m/s}^2)(2 \text{ m})} = 6.26 \text{ m/s}$$

$v_2 = V_{max} = 6.26 \text{ m/s}$ suponiendo que no existan pérdidas por fricción.

Para determinar el tipo de fluido laminar se utiliza número de Reynolds (Ecuación 2)

$$R_e = \frac{V_{max} D \rho}{\mu} \quad (2)$$

Donde: V_{max} = Velocidad sin fricción; D = Diámetro tubería; ρ = Densidad del fluido; μ = Viscosidad del fluido a la temperatura 25°C.

Sustituyendo: $\mu = 8.91 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ y $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$

$$R_e = \frac{(6.26 \text{ m/s})(0.153 \text{ m})(997 \text{ kg/m}^3)}{8.91 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 1071724.646$$

En la Figura 3, se determina el tipo de flujo laminar por el número Reynolds,




- Si $Re < 2000$ el flujo es Laminar $f = 64Re$

- Si $2000 < Re < 4000$ Transición interpolación de Dunlop

- Si $Re > 4000$ el flujo es Turbulento


Figura 3. Clasificación de tipos de flujo laminar por el número Reynolds (Fuente: Elaboración propia).

El resultado es flujo turbulento por lo que se puede utilizar la fórmula de (Swamee-Jain Ecuación 3), para determinar el factor de fricción f .

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left\{ \frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right\} \right]^2} \quad (3)$$

Donde: ε = rugosidad del PVC; D = Diámetro tubería; R_e = Número de Reynolds; f = Factor de fricción

Sustituyendo los valores en la Ecuación de Swamee-Jain, donde: $\varepsilon = 3.0 \times 10^{-7}$ (Mott, 2006)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left\{ \frac{3 \times 10^{-7}}{3.7(0.153 \text{ m})} + \frac{5.74}{1071724.646^{0.9}} \right\} \right]^2}$$

Con la rugosidad y la velocidad encontradas calculamos nuevamente Z_{1N} (Ecuación 1)

$$Z_{1N} = \left[1 + 0.0063 \frac{(6 \text{ m})}{(0.153 \text{ m})} \right] \left[\frac{(4 \text{ m/s})^2}{(2)(9.81 \text{ m/s}^2)} \right] = 2.49 \text{ m}$$

2.49 > 2m

Si Z_1 es mayor que Z_{1N} se debe bajar la velocidad encontrada, lo ajustamos por tanteos para igualar la altura a 2 metros Velocidad a 4 $R_e = 684808.0808$ Resulta un flujo Turbulento.

1.48 < 2

Velocidad a 5.0 $Re = 856010.101$

2=2

Se determina el caudal: $Q = (V)(A) = (5)(0.0183) = 0.0919 \text{ m}^3/\text{s} = 91.9 \text{ L/s}$ y un área de: $A = (\pi)(D^2)/4 = (3.1416)(0.1532)/4 = 0.0183 \text{ m}^2$.

Selección de Turbina

Una turbina es motor rotativo que convierte en energía potencial o cinética del agua, vapor de agua o gas, al pasar en la periférica de un rotor provisto de pales o paletas o alabes o hélices, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza que impulsa la rueda y la hace girar. Siendo esta energía mecánica la que se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, compresor, o generador eléctrico.

Existe tres tipos principales de turbina, dependiendo del caudal de agua y de la diferencia de altura son la turbina Francis, la turbina Pelton y la turbina Kaplan.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó un caudal mínimo de 91.9 L/s así también tenemos una velocidad máxima de operación de 5.0 m/s².

Con estos resultados se evalúan diversas turbinas microhidráulicas en el mercado, las cuales se identifica las siguientes opciones Kaplan, y Pelton para su instalación en el laboratorio, las cuales por la capacidad de operación tienen los siguientes parámetros de operación, altura mínima de 1 m de caída, se considera al menos un caudal de $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$. así como una H (Altura mínima de 1 m).

Requerimientos de instalación.

Se consultaron diversas opciones de equipos comerciales encontrando turbina Kaplan con una altura de operación de 1.5 m y con una velocidad por lo que se encuentra dentro de los parámetros requeridos: Caudal de 35 L/s, altura de 1.5 m y una velocidad de 0.54 m/s, teniendo como requisito la altura mencionada por lo que tiene que considerar la fabricación de un sistema de caída de agua para asegurar el torque necesario en el movimiento del eje del sistema generador.

Para la turbina Pelton se indican velocidades de 20 L/s, este circuito se considera la utilización de sistema de control de parámetros como caudalímetro y manómetro, necesarios para determinar las diversas capacidades de operación y eficiencia del equipo, para aumentar el flujo se instala una bomba vertical la cual permite la recirculación del agua dentro del sistema y la generación continua de la energía.

Se desarrollaron los modelos dimensionales con los sistemas hidráulicos considerados en software SolidWorks para turbina Kaplan (Figura 4) y para turbina Pelton (Figura 5), con esto se asegura la correcta instalación y dimensionamiento de la configuración del laboratorio y listado de materiales requeridos para la instalación y puesta en operación.

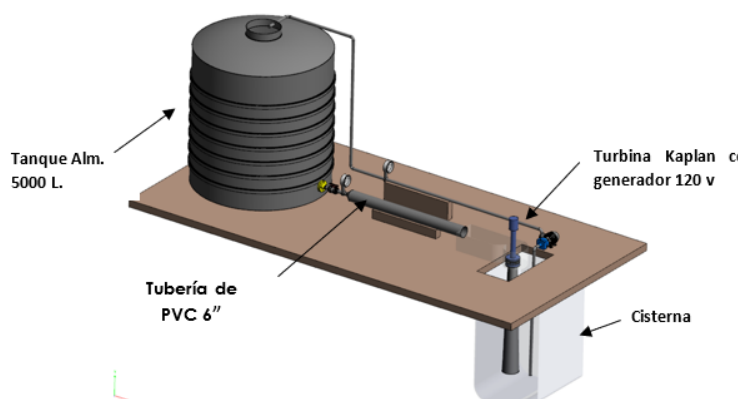


Figura 4. Arreglo de sistema de generación con microturbina tipo Kaplan (Fuente: Elaboración propia).

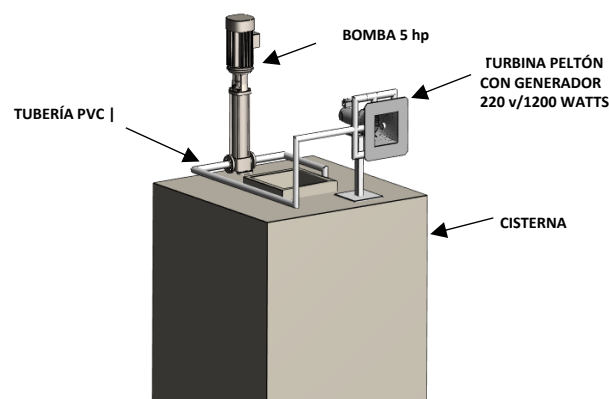


Figura 5. Arreglo de sistema de generación con microturbina tipo Pelton (Fuente: Elaboración propia).

Puesta en operación

Se realizó el ensamble de los circuitos de las turbinas (Figura 6), los ajustes y pruebas de regulación del caudal en la válvula de corte de 6 pulgadas, para el circuito de la turbina Kaplan, está turbina de acuerdo a manual requiere iniciar con una autopropulsión, para la demostración de la generación de energía de la turbina Kaplan. Se instaló una alarma de consumo, la cual generó 124 VCA, la turbina Kaplan demostró operar con el pequeño salto de agua, lo que permite proponer en zonas de caídas pequeñas y con presiones muy bajas. El circuito Pelton generó 24 VDC y 220 W, de corriente alterna, este circuito cuenta con caudalímetro y manómetro los cuales permiten comprobar la eficiencia del sistema mediante la determinación de los caudales mínimo y máximo de operación de la turbina.



Figura 6. Sistema operación turbinas, CIATEQ, Cunduacán, Tabasco (Proyecto CIATEQ)

Conclusiones

La implementación de este laboratorio de microhidráulica permite la demostración y transferencia del conocimiento para el empleo de microgeneración, con diversas instituciones, escuelas y grupos locales, poniendo de manifiesto la oportunidad del aprovechamiento hidráulico de la región y el país, además de la demostración de la fácil operación de la tecnología, y nula contaminación en la generación de energía.

El laboratorio contribuye además a probar diseños propios, y comprobar la eficiencia de la tecnología en un ambiente controlado para garantizar los parámetros de diseño en prototipos.

La utilización de estas micro hidroeléctricas resulta una oportunidad de solución para el aprovechamiento del recurso hídrico, a pequeña escala, evitando efectos negativos en relación con las grandes centrales, ya que no requieren de gran capacidad de almacenamiento de agua como se muestra, ni de transporte de energía. Esto es, son centrales de producción de electricidad in situ.

A pesar de los avances tecnológicos, existen regiones o poblaciones que no cuenta con energías para el desarrollo de sus actividades cotidianas por lo que promover este tipo de sistemas de microgeneración a las generaciones resulta

una oportunidad de fortalecer las energías renovables y el cuidado de los recursos renovables, como lo es la microgeneración hidráulica.

Bibliografía

- Canaza Choqueluque, J. T., & Chara Surco, H. (2018). Diseño e Implementación de un módulo de turbina Pelton para el laboratorio de energía de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8313>.
- Crowe, C. T., Elger, D. F., Roberson, J. A., Williams, B. C. (2009). *Engineering Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons. 9a. Edición.
- Fernandez Ortiz, E. J., & Santamaria Ramos, C. H. (2023). Diseño de una micro central hidroeléctrica utilizando una turbina vórtice para suministrar energía eléctrica en la Represa La Puntilla–Pampa Grande.
- Irazusta, M. B. (2020) *Banco de pruebas Microturbina Turgo*. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/12205>.
- García, G. H. (1985) *Apuntes de selección de turbinas hidráulicas*. México, Facultad de Ingeniería UNAM
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Pearson. 6a. Edición.
- Reyna, T., Lábaque, M., Irazusta, B., Reyna, S., & Riha, C. (2017). Microturbinas hidráulicas. Diseño, adaptaciones para enseñanza de microgeneración. In *XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*.
- Rivas Carpio, J. de J. (2014). *Evaluación del potencial hidroeléctrico en la cuenca del río la antigua con enfoque de energía renovable*. Tesis de Licenciatura.
- SENER (2012). *Perspectivas de energía renovables*.