



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN
ENERGÍAS RENOVABLES**

**MAESTRIA EN MATERIALES Y SISTEMAS
ENERGÉTICOS RENOVABLES**

TESIS

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA
HIDRÁULICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA MEDIANTE TURBINAS HIDRÁULICAS**

PRESENTA:

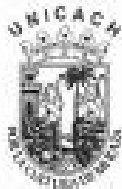
Carlos Artemio Macias Rodas

DIRECTORES:

DR. PASCUAL LÓPEZ DE PAZ

DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT

MAYO 2019



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
07 de mayo de 2019
Oficio No. DIP/0291/2019

C. Carlos Artemio Macías Rodas
Candidato al Grado de Maestro en Materiales
y Sistemas Energéticos Renovables UNICACH
Presente

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la **opinión favorable** de la Comisión Revisora que analizó su trabajo terminal denominado **"Modelado y simulación de un banco de pruebas hidráulico para la generación de energía eléctrica mediante turbinas hidráulicas"**, y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión del documento** mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que Usted sustentará para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

Atentamente

"Por la Cultura de mi Raza"



Dra. Magnolia Solís López
Directora

C.C.B. Expediente
*MSL/rsp



Ciudad Universitaria
Lib. Norte Poniente núm. 1150
Colonia Lajas Maciel C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Tel: (01 961) 61 70 440 Ext. 4350
investigacionyposgrado@unicach.mx

Dedicatoria

A mis padres, que siempre están ahí para mi y que representan todo lo que he hecho y para todo lo que me esfuerzo día con día. A mi hermana, que me acompaña siempre y es un apoyo constante.

Agradecimiento

Agradezco principalmente al Dr. Pascual López de Paz y al Dr. Orlando Lastres Danguillecourt por su apoyo constante para el desarrollo de este proyecto de investigación. Siendo bases importantes para lograr que este proyecto saliera adelante.

Agradezco completamente al IIIER por permitirme utilizar las instalaciones para llevar a cabo este proyecto de investigación y brindarme lo necesario para su ejecución

Agradezco a CONACYT por la beca otorgada para ayudarme a concluir la maestría y facilitar así el desempeño en este proyecto.

Contenido

Capítulo 1.- Generalidades.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Estado actual.....	11
1.2.1 Conclusiones.....	16
1.3 Problemática.....	16
1.4 Justificación.....	17
1.5 Objetivo general.....	17
1.6 Objetivos específicos.....	17
1.7 Estructura de la tesis.....	18
Capítulo 2.- Marco Teórico.....	19
2.1 Introducción.....	19
2.2 Estudios previos y modelos para la evaluación y simulación de un banco de pruebas hidráulico.....	19
2.2.4 Análisis de duración de flujo (Flow duration curve).....	27
2.2.5 Componentes principales en un sistema de micro generación hidráulica.....	35
2.2.6 Turbinas hidráulicas.....	41
2.2 Ensayo para la evaluación de una turbina tipo Michell Banki.....	43
2.4 Simulación de un sistema hidráulico.....	45
2.4.1 Análisis de fluidos computacional.....	45
2.4.2 Regímenes analizados y ecuaciones gobernantes.....	46
2.5 Conclusiones.....	46
Capítulo 3.- Metodología.....	46
3.1 Introducción.....	46

3.2 Etapas del proyecto.....	47
3.3 Evaluación del banco de pruebas.....	47
3.3.1 Evaluación hidrológica.....	47
3.3.2 Evaluaciones de demanda de carga.....	49
3.3.3 Evaluaciones ambientales.....	49
3.3.4 Esquema para el análisis.....	50
3.4 Análisis de duración de flujo (Flow duration curve) para el modelado y simulación	51
3.4.1 Colección de datos por recopilación anual (flow curve).....	52
3.5 Análisis y determinación de los componentes principales del sistema de micro generación hidráulica para el modelado y la simulación.....	54
3.5.1 Introducción.....	54
3.5.2 Determinación y análisis de los sistemas de generación hidráulica (turbina).....	57
3.6 Simulación del banco de pruebas hidráulico.....	57
3.7 Conclusiones.....	58
Capítulo 4.- Resultados.....	59
4.1 Evaluación del banco de pruebas.....	59
4.1.1 Evaluación del suministro de Energía Primaria.....	59
4.1.2 Análisis de pérdidas por fricción.....	61
4.1.3 Evaluación del sistema de turbinas.....	63
4.2 Validación de los modelos matemáticos aplicados a la evaluación y Rediseño del banco de pruebas.....	65
4.2.1 Validación de los modelos.....	65
4.2.2 Propuesta de rediseño.....	67
4.2.2.1 Estructura.....	67
4.2.2.2 Red hidráulica (Tuberías).....	68
4.2.2.3 Sistema de suministro.....	69

4.2.2.4 Reservorios.....	69
4.3 Simulación y análisis de los modelos aplicados al rediseño.....	71
4.3.1 Simulación del modelo aplicado a la potencia de generación.....	71
4.3.2 Simulación del modelo aplicado a la velocidad de giro del sistema.....	72
4.3.3 Simulación de la turbina con la geometría actual.....	73
4.4 Conclusiones generales.....	75
Referencias.....	78

Capítulo 1.- Generalidades

1.1 Introducción

El uso de la energía ha acompañado a la actividad de los seres humanos desde la más remota antigüedad. La mera existencia de un ser humano exige que éste ingiera alimentos, que no son otra cosa que combustibles ecológicos, en las cantidades precisas para mantener el metabolismo basal y llevar a cabo los procesos vitales, así como para realizar el trabajo necesario para sobrevivir [1].

En la actualidad, la demanda de proyectos que involucren la generación de energía aprovechando recursos naturales, empleando formas de energía renovable y aprovechando el recurso de forma óptima ha incrementado y es común ver prototipos y propuestas instaladas y expuestas en universidades, aplicadas a diversas áreas. Esto se debe principalmente al modelo de vida actual, que implica altas demandas respecto al consumo energético y que emplea principalmente combustibles fósiles, buscando poder emplear diversos recursos para solventar y disminuir la huella ambiental que provoca el uso desmedido de este tipo de combustibles.

El agotamiento gradual de los recursos energéticos fósiles, especialmente de aquellos llamados convencionales o de fácil extracción, es un proceso en marcha ampliamente reconocido. Los estudios acerca de las perspectivas de agotamiento de los diversos combustibles fósiles son relativamente abundantes en la literatura científica, pero pocos ofrecen una perspectiva global de todas las fuentes energéticas y de sus posibles sustitutos tecnológicos, y aún menos tienen en cuenta la demanda asociada al sistema socioeconómico [2].

El modo en que la sociedad actual utiliza la energía y de los problemas derivados de tal uso pone de manifiesto la urgencia por encontrar soluciones. Las denominadas energías de fuentes renovables pueden contribuir a resolver o mitigar las dificultades de abastecimiento que al parecer se presentarán inevitablemente en un futuro cercano. Las fuentes donde se originan las energías renovables son el sol, la gravedad, la rotación de la tierra y el calor interno de la tierra [3]. Twidell y Weir definen a las energías renovables como esa “energía que se obtiene a partir de corrientes de energía continuas y recurrentes en el mundo natural”

, mientras que para Sorensen es todo “flujo energético que se restablece al mismo ritmo al que se utiliza” o, también, “el uso de cualquier depósito de energía que se rellena a velocidad comparable a la que es extraída”. Mientras que la energía no renovable sería aquella que se obtiene a partir de acumulaciones “estáticas” de energía, que permanecen fijas hasta que se liberan por los seres humanos. Son ejemplos los combustibles fósiles y los nucleares [1].

Las energías renovables a nivel mundial representan el 18% de la generación eléctrica, (la mayoría de esta participación considera las energías hidráulica y eólica) mientras que, la contribución al suministro térmico de las energías renovables es de un 24%. La participación de las energías fotovoltaica, solar, eólica y la bioenergía ha crecido rápidamente en los últimos años, efecto que se atribuye a las inversiones en investigación y desarrollo que se iniciaron hace más de tres décadas [4].

La energía hidráulica es la fuente renovable de electricidad más importante y más utilizada en el mundo, registrando 970 GW de capacidad de generación eléctrica en 2011. El crecimiento de centrales hidroeléctricas en el periodo 2001-2011 ha sido del 3% anual. China es el productor más importante de energía hidroeléctrica, seguido por Brasil, Estados Unidos, Canadá y Rusia. La mitad de la capacidad hidroeléctrica se concentra en estos cinco países ubicados en diferentes regiones del mundo: China (22%), Brasil, Estados Unidos, Canadá y Rusia, con un 8% de participación cada uno [5]. El resto de la capacidad instalada se concentra en países de Europa (Suecia, Francia, Italia, España, Austria, Suiza, Alemania y Rumania), que en su conjunto representan el 13% de la capacidad; los países asiáticos por su parte aportan 8% de la capacidad (India, Japón, Pakistán, Vietnam, Indonesia). Por su parte, los países de América Latina aportan el 7% (Venezuela, Paraguay, Colombia, México, Argentina, Chile y Perú) [5].

En México, aproximadamente del 14 al 16% de la energía producida es proveniente de fuentes renovables de energía. La ley para el aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento para la Transición Energética (LAERFTE) establece que para el 2024 el 35% de la energía que se producirá en el país será generado a través de fuentes no fósiles. Se considera como renovables a los proyectos hidroeléctricos con capacidad hasta 30 MW, o proyectos hidroeléctricos de más de 30 MW con almacenamientos menores a 50 mil

metros cúbicos de agua o que tengan un embalse con una superficie menor a 1 hectárea y que no rebasen dicha capacidad de almacenamiento. Esta se refiere a embalses ya existentes, aún de una capacidad mayor, que sean aptos para generar electricidad [6].

México tiene una capacidad instalada de 15,389 MW y una producción de 50,383 GWh/a con base a fuentes renovables de energía, de lo cual entre el 78%, es decir, 12,474 MW y cerca del 76%, aproximadamente 38,300 GWh/a, son generadas mediante aprovechamiento hidráulico a través de 79 centrales hidroeléctricas en el país, de las cuales Chiapas posee siete centrales hidroeléctricas que, en sumatoria aportan el 47% de la energía hidroeléctrica de México [7].

En Chiapas, se tiene una capacidad instalada de 4,828 MW, cuatro de las centrales se clasifican en el tipo grandes hidroeléctricas, y las tres restantes como pequeñas hidroeléctricas, todas ellas estas pertenecen a la Comisión Federal de Electricidad [7].

En cumplimiento a LAERFTE, se han realizado estudios de factibilidad de zonas para desarrollar proyectos generadores de energías renovables. Para el caso de las energías de fuente hidráulica en el estado de Chiapas, se tiene un registro de 5 proyectos en desarrollo con una capacidad efectiva total de 114.5 MW, con una generación de energía de 580 GWh/a [7].

Existen 78 zonas factibles para el desarrollo de pequeñas hidroeléctricas, 11 posibles zonas para el desarrollo de centrales hidroeléctricas de diversa clasificación o capacidad en el estado de Chiapas, con una proyección de 1195 MW de capacidad efectiva en total, y 10,468 GWh/a que aún no han sido aprovechadas [7].

La micro generación hidroeléctrica, se emplea como solución energética en zonas que carecen del servicio de energía eléctrica; sin embargo, poco se conoce sobre experiencias de diseño y fabricación de micro generadores hidráulicos o bancos de pruebas hidráulicas para el aprovechamiento de un recurso hídrico específico. Por lo general, se emplean micro generadores que han funcionado adecuadamente en un rango de valores de cabeza y caudal determinados, pero se desconoce su eficiencia de acuerdo con las condiciones de operación a las cuales está siendo sometido [8]. Esto generalmente se inicia como un banco de pruebas, para evaluar el comportamiento individual y en conjunto de dichos sistemas.

En esta central se utilizan dos turbinas, pero la que se analiza en esta investigación es una turbina de flujo cruzado, una Michell Banki.

La Turbina Hidráulica de Flujo Cruzado (ver ilustración 1) es un motor hidráulico clasificado generalmente como una turbina de acción, que dependiendo del modelo, presenta ciertas características de una turbina de reacción (modelos donde el inyector se encuentra muy próximo al rodete), por ello se clasifica como turbina límite, recomendada para el aprovechamiento de pequeños saltos hidráulicos y caudales moderados ($P < 1000$ kW), por su bajo costo de manufactura ligado a su sencillez constructiva y su buen desempeño a cargas parciales, en comparación con las alternativas tecnológico – comerciales convencionales.

Desde su difusión en nuestro medio en 1961 [17], la turbina no ha sufrido modificaciones sensibles con respecto a su diseño original; tampoco se han revisado, reformulado y replanteado principios, supuestos y relaciones en los que se basa. En general la mayoría de los trabajos desarrollados se orientan al mejoramiento del diseño y operación [18], [19], y en menor grado a la formulación de modelos teóricos para el diseño y la optimización del comportamiento.

En este contexto, se plantea la necesidad de efectuar un análisis teórico a partir de un conjunto de ecuaciones que rigen al diseño de la turbina, resueltos bajo un enfoque alternativo, en cierto modo diferente al originalmente asumido en su concepción y difusión. Ello se aborda desde una perspectiva teórica en el análisis del efecto de espesor de álabe y la contracción de la vena al interior de la turbina, obteniéndose como resultado innovaciones en su diseño, específicamente en relación con el diseño del rodete (ángulo relativo del flujo al abandonar el rodete, β_1 , relación de diámetros interno – externo, D_1/D_2 , entre otros). Así mismo, se hace una comparación entre los modelos teóricos propuestos y los modelos teóricos convencionales [20].

Se presenta entonces la necesidad de establecer una metodología alternativa a fin de determinar el desempeño y ventajas de las innovaciones de la Turbina Hidráulica de Flujo Cruzado de Diseño Modificado, como resultado del análisis del efecto del espesor de álabe y la contracción de la vena al interior de la turbina; para ello se adopta el empleo de la

Dinámica de Fluidos Computacional, comparativo al enfoque experimental, teniendo como ventaja de ello tanto la amplitud de análisis así como la economía.

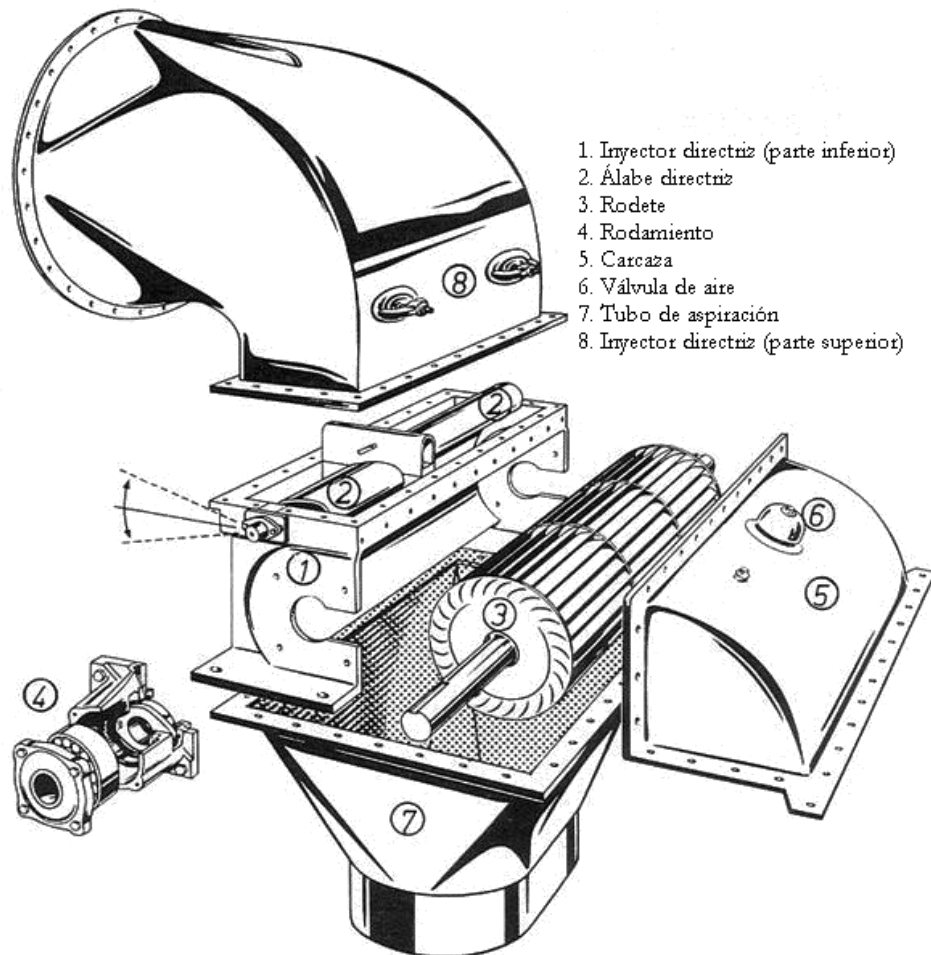


Ilustración 1 Turbina Hidráulica de Flujo Cruzado

Un banco de pruebas ofrece soluciones significativas con respecto a la comprobación de funcionamiento de los componentes de un sistema de micro generación hidráulica.

El diseño desarrollado para el banco de pruebas permite el análisis y cálculo de vaciado y llenado de los depósitos, suministro de agua empleando sistemas de bombeo alimentados con energías renovables, análisis y cálculo de pérdidas de carga debido a la fricción en tuberías y accesorios, así como el comportamiento respecto a la variación de flujo en las turbinas hidroeléctricas.

El banco de pruebas debe contar con un sistema de adquisición de datos que incluya sensores de presión, flujo, medición de variación de potencia, resistencia, intensidad-voltaje e interfase con pantalla digital permitiendo la fácil lectura de los datos adquiridos. Sistemas de distribución, alimentación, generación, recopilación de resultados y el análisis de estos. Otras consideraciones generales para el banco de pruebas es que deben ser completamente automatizados. Otra consideración que tomar en cuenta como criterio de diseño, es la metodología de construcción que se debe emplear, para saber cómo se hará, el tipo de modelado y los resultados que se obtendrán.

Lo primero a considerar en un banco de pruebas hidráulico es el uso y aplicación que se le dará, ya que de eso dependen los componentes, consideraciones de diseño y la magnitud del sistema hidráulico. Un banco de pruebas puede ser instalado para probar sistemas de bombeo, sistemas de generación hidroeléctrico e incluso para determinar criterios de diseño y evaluación de redes hidráulicas (tuberías). Teniendo en cuenta el uso, entonces ya se puede definir como se suministrará la energía primaria (recurso hídrico), si será aprovechado de una fuente natural, o se utilizará mediante sistemas de bombeo o canales, esto también está en función del tipo de banco de pruebas que se considere, así como el almacenamiento en caso de que se necesite mucho más recurso del que se tenga disponible. La adquisición de datos o investigación es un trabajo muy importante y fundamental para el proyecto de diseño, comparado con la mediana y gran generación, la colecta de datos para pequeña generación hidráulica presenta características mucho más simplificadas, rápidas, económicas y apropiadas. Cómo sea, estas características de colección de datos no implican complejidad, pero implica un método adaptado justamente al proyecto, para trabajar con características específicas de operación que no implican reproducir lo realizado en un proyecto a mayor escala, sino personalizado [9].

Con el fin de conocer cómo funciona este sistema, se desarrolla una metodología de análisis de la instalación hidroeléctrica del IIIER para obtener un reporte de operación y así poder obtener un mejor aprovechamiento de este recurso hídrico específico como energía renovable.

El INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES (IIIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, cuenta con un

Banco de Pruebas de Tecnologías Hidráulicas de Fuentes Renovables, para implementar modelos educativos basados en la experiencia y verificación de la parte teórica, aplicando los conocimientos adquiridos en el aula de forma práctica en un banco de esta naturaleza.

El banco de pruebas es un sistema energético renovable que, mediante un conjunto de elementos, partes y componentes, configurados y distribuidos de forma conveniente permiten evaluar y caracterizar diversas tecnologías de aprovechamiento y transformación de la energía cinética contenida en el agua en energía eléctrica. En este tipo de proyectos, se busca simular el funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica y permitir disponer de una herramienta que, a como se menciona antes, sea empleada para capacitar e incentivar a estudiantes, docentes y comunidad académica en el desarrollo de esta clase de proyectos que puedan generar en el estado de Chiapas.

En el banco de pruebas, objeto de estudio, se considera una capacidad de 5 y 8 kW, dado que “las potencias son promedio respecto al abastecimiento de electrificación a las comunidades rurales”. Fue diseñado considerando la operación generalmente sometida, características fisiográficas en que el caudal y las variaciones de cotas de los efluentes son similares a los requeridos para estos sistemas. La descripción del modelo de funcionamiento del banco de pruebas se detalla a continuación:

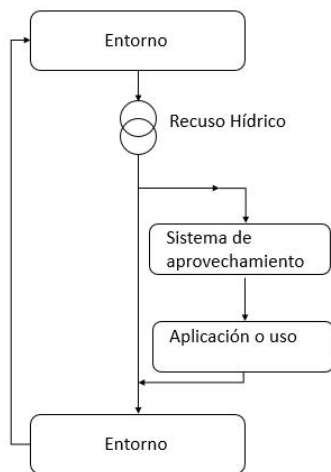
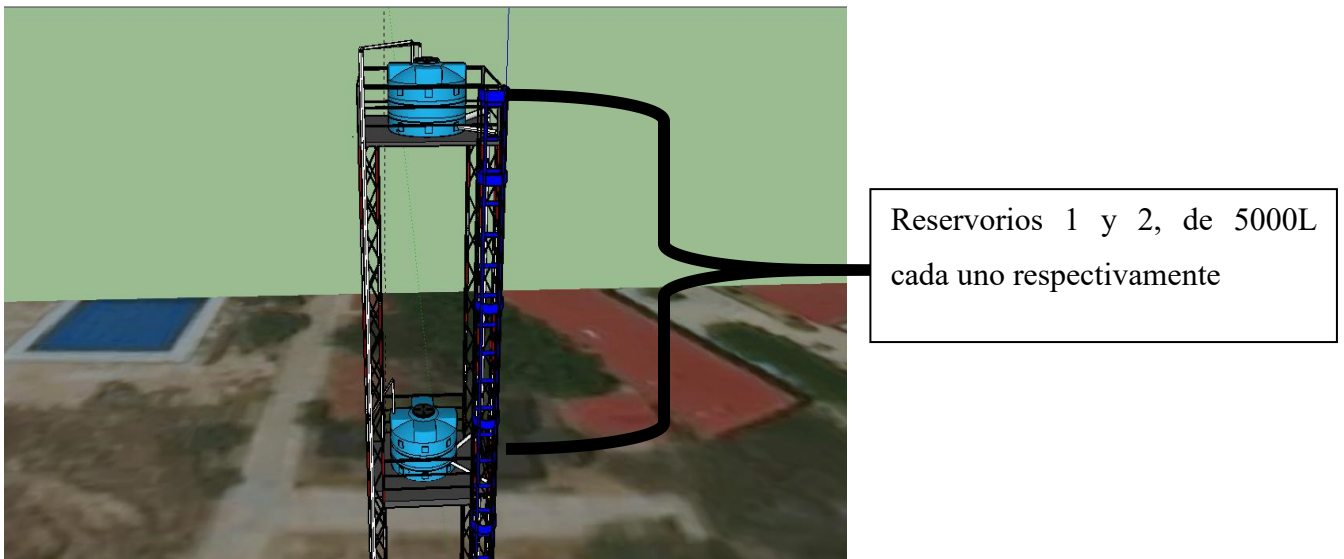


Ilustración 2 Esquema de funcionamiento del banco de pruebas hidráulico

Como se observa en la ilustración 2, el recurso hídrico se obtiene de un entorno natural (un pozo con una profundidad de 60m), del cual mediante un sistema compuesto de una red

hidráulica circula dicho fluido hacia el sistema de aprovechamiento (un cuarto de máquinas en el que se encuentran instaladas dos turbinas, una tipo Michell Banki y otra tipo Turgo, ambas con una capacidad de generación eléctrica que varía entre los 5 y 8kW, potencia nominal) que a su vez se conecta a un sistema de control y medición, para realizar las pruebas pertinentes en dicho banco de pruebas. El propósito de este banco de pruebas es realizar prácticas de generación hidráulica mediante el uso de turbinas, esto simulando una micro central hidroeléctrica. La descripción física del banco de pruebas se muestra a continuación:



Reservorios 1 y 2, de 5000L
cada uno respectivamente

Ilustración 3 Sección superior Banco de pruebas

Como se puede observar en la ilustración 3, el banco de pruebas cuenta con dos reservorios con capacidad de 5000 litros cada uno respectivamente. Conectados al sistema de bombeo fotovoltaico por una red hidráulica (tuberías) de 1" de diámetro de subida. Con una tubería de descarga de 4 y 6" cada una, pero por cuestiones de diseño se trabaja la descarga en la tubería de 4".

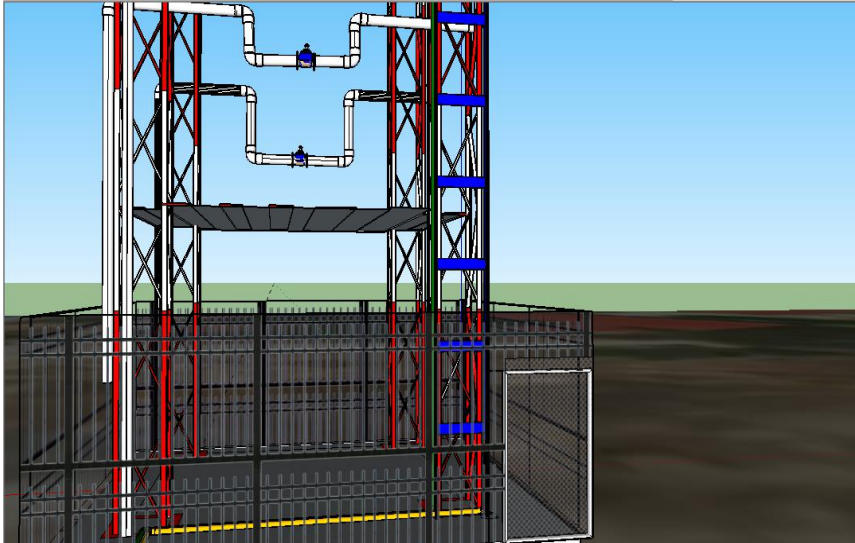


Ilustración 4 Sección inferior del banco de pruebas

Como se observa en la ilustración 4, esta tubería va conectada al cuarto de turbinas, donde se realiza la descarga y las pruebas respectivas en cada una de las turbinas.

1.2 Estado actual

- **Design, simulation, construction and characterization of a 5kW hydraulic Pelton turbine.** Sergio Agudelo, Edwin Chica, Felipe Obando, Natalia Sierra, Laura Velásquez, Walter Enríquez. En este trabajo, presentan una metodología de construcción para un micro generador hidráulico para condiciones de operación dadas, así como el modelo de componentes mediante bases teórico experimental asistido por herramientas computacionales tipo CAD (Diseño Asistido por Computadora) y CFD (Análisis Computacional Fluidodinámico). También proponen el uso de un software tipo CAM (Manufactura asistida por computadora) y procesos de fundición para la fabricación de componentes del micro generador. Esta metodología de diseño es útil para entender los parámetros de entrada y que son necesarios para el diseño de turbinas. Así mismo, presenta gráficos que se deben considerar en la simulación de un sistema de micro generación que se usará como base para proponer uno propio.
- **A Real-Time Regulator, Turbine and Alternator Test Bench for Ensuring Generators Under Test Contribute to Whole System Stability.** Marc Langevin, Ph.D. Marc Soullière, Jean Bélanger. Este artículo proporciona un diagrama de

bloques para generadores de velocidad en un laboratorio de simulación y en una central hidroeléctrica, esto permite conocer los diagramas que se pueden proponer y así, utilizar un sistema parecido para la programación y simulación del generador que se propondrá en el trabajo de tesis. Así mismo, esto facilita estimar como reaccionaría ya conectado a una turbina y ver la variabilidad respecto al caudal, cabe mencionar también, que esta implementación permite realizar configuraciones y adecuaciones más precisas sin necesidad de alterar la instalación, ya que la evaluación es previa a la instalación.

- **A Micro-ORC Energy System: Preliminary Performance and Test Bench Development.** Ancona M.A., Bianchi M., Branchini L., De Pascale A., Melino F., Orlandini V., Ottaviano S.m, Peretto A., pinelli M., Spina P. R., Suman A. Esta investigación permite identificar el potencial de Mercado para pequeños generadores de electricidad, es decir, la generación de energía a microescala. Esto nos sirve principalmente para ver el porvenir y la proyección que tiene la investigación a mediano plazo.
- **Hydraulic performance of a modified constructed wetland system through a CFD-based approach.** Emily Elizabeth Rengers, Jhonatan Barbosa da Silva, Paula Loureiro Paulo, Johannes Géron Janzen. Este artículo permite analizar el uso del un software tipo CFD para la evaluación de sistemas hidráulicos, conocer parámetros a evaluar y los diferentes procesos que se llevan a cabo. Esta investigación También facilita la comprensión de tecnologías para distribución y saneamiento que facilita y beneficia el diseño de ingeniería.
- **Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing, and Analysis.** Michelson Shane, Mueller Mitch, Schurman Brett. Este trabajo tiene como objetivo construir, probar y analizar un circuito para un banco de pruebas hidráulicas. Específicamente los sistemas de control de potencia es un componente importante y común e importante de la mecánica en el diseño de sistemas hidráulicos, potencias, presión, tasas de flujo, esto implica que sean estos factores, importantes al analizar cualquier Sistema hidráulico, así como permitir el uso justificado de sistemas de control y automatización. En este artículo se presenta una tabla que muestra los componentes

a la entrada y salida de control, lo que se utilizará para justificar la propuesta de automatización. Es decir, asegurar que el diseño de un sistema hidráulico sea funcional, eficiente y seguro.

- **Nonlinear dynamic analysis and robust controller design for Francis hydraulic turbine regulating system with a straight-tube surge tank.** Ji Liang, Xiaohui Yuan, Yanbin Yuan, Zhihuan Chen, Yuanzheng Li. Este artículo presenta un modelo matemático para regular una turbina Francis con un tanque de expansión de tubo recto basado en algunas ecuaciones de estado-espacio para estudiar los comportamientos dinámicos del sistema. Esto permite entonces asegurar la estabilidad y seguridad del Sistema de regulación de turbinas hidráulicas, lo que implica el rápido desarrollo y aplicación de la tecnología de energía hidroeléctrica. Esto permite utilizar ciertos modelos matemáticos para la evaluación de sistemas de generación mediante turbinas, que es, el objeto final de una metodología de diseño de micro generación hidráulica, así como confirmar el diseño de un sistema de micro generación, el esquema de tuberías y el apartado de máquinas.
- **A selected literature review of efficiency improvements in hydraulic turbines.** Xin Liu, Yongyao Lou, Bryan W. Karney, Weizheng Wang. Este artículo hace un análisis de los diferentes estudios que se realizan en las turbinas, así como datos de eficiencia y rendimiento de la turbina, los cuales son esenciales para la selección y uso informado de las mismas. También hace hincapié en que se carece de una base de datos universal que permita conocer las características de una turbina. Esto entonces, demuestra la importancia de registrar todos los parámetros posibles que se pueden evaluar en un sistema de generación hidráulica, así como, comparar los resultados obtenidos con investigación que se está realizando en distintos lugares, comparar gráficos y si el tiempo de investigación lo permite, profundizar en análisis y simulaciones.
- **A Feasibility Study of Power Generation from Sewage Using a Hollowed Pico-Hydraulic Turbine.** Tomomi Uchiyama, Satoshi Honda, Tomoko Okayama, Tomohiro Degawa. Este estudio nos permite conocer la viabilidad de la generación de energía utilizando una turbina pico hidráulica, con lo que entonces, se pueden

aplicar los modelos utilizados para evaluar nuestro sistema y simular su funcionamiento, así como explorar el comportamiento de generación y eficiencia con la variación de caudal. Así mismo, permite utilizar modelos para evaluar el rendimiento de nuestras turbinas y estimar datos de generación.

- **Performance Testing and Evaluation of Small Hydropower Plants.** H. K. Verma, Arun Kumar. Este artículo comprueba la necesidad de realizar pruebas de rendimiento y evaluación de las centrales hidro eléctricas, misma necesidad que se refleja a nivel mundial, incluso la propuesta de que en India sean un requisito previo las pruebas de rendimiento para obtener subsidios para nuevas estaciones de picogeneración en dicho país.
- **Turbine Performance Characteristics.** R. P. Saini. Saini hace hincapié en que las pruebas de campo de salida y eficiencia en turbinas permiten determinar parámetros de salida y eficiencia in situ, esto con la finalidad de mejorar las turbinas instaladas y poder caracterizar su funcionamiento.
- **Diseño y Construcción de una Pico Central Hidroeléctrica utilizando una turbina Michell Banki para Generación Eléctrica en el Sector de las Carmelitas del Cantón Tena.** Landa Freddy, Llaganate Eduardo. Esta investigación tiene impacto directo en el diseño, ya que se utiliza una turbina tipo Michell Banki, y el sistema propuesto para simulación y modelado utiliza una turbina del mismo tipo, con lo que, se permite profundizar en los parámetros importantes al diseñar y probar este tipo de turbinas, teniendo así un análisis detallado y profundo de los resultados. Esto también permite reforzar la propuesta de un análisis del potencial a diferentes cuadales.
- **Micro-Central Vernis: Energía Hidráulica Producida en Casa.** José Luis Lorenzo Escuín, Vernis Motors, S.L. P. Saini. Este proyecto de instalación se usa como base de investigación al ser un sistema de generación hidroeléctrica vertical, y para comparar los datos técnicos de generación, conocer los parámetros más importantes a evaluar y que se espera de cada uno de ellos.

- **Analysis of the Mini Turgo Hydro Turbine Performance for Different Working Regimes.** Shpetim Lajqi, Xhemajl Fejzullahu, Naser Lajqi, Hestet Hajdini. Este estudio permite justificar la altura de diseño para el caudal, así como comparar la eficiencia respecto a la altura de caída, entre otros parámetros de diseño.
- **Soluciones Prácticas ORG, 2015.** La micro generación hidroeléctrica se emplea como solución energética en zonas que carecen del servicio de energía eléctrica; sin embargo, poco se conoce sobre experiencias de diseño y fabricación de microgeneradores hidráulicos o bancos de pruebas hidráulicas para el aprovechamiento de un recurso hídrico específico. Por lo general, se emplean microgeneradores que han funcionado adecuadamente en un rango de valores de cabeza y caudal determinados, pero se desconoce su eficiencia de acuerdo a las condiciones de operación a las cuales está siendo sometido
- **Design considerations of Micro-Hydro-Electric Power Plant,** Bilal Abdullah Nassir. Este artículo es base para el empleo de una metodología de diseño, propone los pasos y variables a determinar en la simulación, así como facilitar la discusión de resultados. También se establece el hecho que el flujo puede ser variable de una fuente natural o un tanque que simule un flujo con capacidad variable.
- **An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response Surface methodology.** Kyle Gaiser, Paul Erickson, Pieter Stroeve, Jean-Pierre Delplanque. De este artículo se extrae la base que justifica las variables de evaluación, del cual se presenta un extracto a continuación. *“La idoneidad de una turbina hidroeléctrica para un sitio en particular depende del cabezal del sitio, H , y del caudal de agua Q . Las turbinas de impulso, tales como Pelton y Turgo, son adecuadas para sitios con condiciones de alta presión y bajo caudal”.*
- **Simulation and implementation of micro hydro generation for small rural loads.** Kanzumba Kusakana, Herman Vermaak, Galu P Y. uma. Este artículo presenta especificaciones para el diseño de sistemas de generación, donde implica directamente que la energía que necesita la carga debe evaluarse también para

determinar si existen recursos suficientes del agua para sostener el desarrollo de la microplanta. Esto también, consiste en evaluar el sistema con una diferencia de caudales donde se implique el diseño durante el peor y mejor mes, respecto al recurso hídrico. En el caso del flujo controlado, se propone entonces con variaciones de caudal controlado mediante un sistema de automatización.

- **Desarrollo de un banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuente renovable.** Eder Fabian Medina Morales. Este trabajo es el antecesor de la tesis, donde se describe paso a paso la construcción del banco de pruebas y las evaluaciones previas que se han realizado, también deja las pautas necesarias para los trabajos que vengan a continuación.

1.2.1 Conclusiones

De estos artículos se obtiene como conclusión que cualquier banco de pruebas que sea instalado, debe ser validado por normas, modelos matemáticos y pruebas in situ para comprobar el funcionamiento correcto del mismo, pero al mismo tiempo se concluye que si por cuestiones de diseño, algo no sale como esperaba, entonces se puede dar una vuelta al problema y convertirlo en un nicho de oportunidades, utilizando estos fallos como una oportunidad para validar teorías aplicadas en la vida real, para demostrar con un sistema colapsa o cuales son los puntos que logran que el sistema mejore, es decir, evaluar, rediseñar y simular un banco de pruebas es una tarea necesaria para cualquier centro que cuente con él, ya sea que se encuentre instalado o sea un paso para el diseño.

1.3 Problemática

Chiapas, cuenta con grandes potenciales de recursos hidricos, principalmente de corrientes superficiales mediante los escurrimientos de rios y arroyos; sin embargo, el aprovechamiento de este recurso que, si bien ha sido utilizado en ciertas zonas para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos, no se cuentan con bancos de pruebas que nos permitan evaluar turbinas utilizadas para micro generación, sistemas de distribución hidráulica, sistemas de bombeo y características básicas de diseño.

El banco de pruebas que se encuentra en el IIIER si bien cuenta con un análisis previo de funcionamiento de las turbinas, no es un sistema que esté caracterizado por modelos matemáticos específicos y los pasos de evaluación correctos para validar el funcionamiento

de las turbinas, procesos de ensayo y procedimientos según normas. Por otra parte, se dejó la pauta para evaluar y rediseñar el sistema a partir de la turbina Mitchell Banki, ya que el análisis realizado en el trabajo que precede a esta investigación solo considera la turbina tipo Turgo. El mal aprovechamiento de un sistema hidráulico no permite tener una evaluación certera de los sistemas y por ende el deterioro del sistema en sí.

1.4 Justificación

El propósito de esta tesis es realizar un aprovechamiento, reacondicionamiento y rediseño de la infraestructura existente y proponer mejoras al diseño que asegure el correcto funcionamiento de la instalación hidroenergética para realizar pruebas, evaluaciones y generar energía eléctrica utilizando el agua como fuente de energía renovable, mientras que el desarrollo de micro centrales se ve justificado por la necesidad de desarrollar nuevas y propias formas de generación de energía limpia, que nos permita sustituir a los generadores con energía convencional, estas pruebas y análisis proporcionarían datos precisos para la toma de decisiones en la aplicación de estas tecnologías de generación de energía en lugares donde se disponga y pueda aprovecharse este recurso hídrico.

Para el mejor aprovechamiento de este recurso disponible es importante realizar investigaciones relacionadas con las tecnologías existentes para la generación de energía.

1.5 Objetivo general

Evaluar, rediseñar y simular el banco de pruebas hidráulico del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables

1.6 Objetivos específicos

1. Evaluar el banco de pruebas de sistemas hidráulicos
2. Rediseñar el banco de pruebas de sistemas hidráulicos
3. Simular el banco de pruebas y proponer adecuaciones para mejorar el funcionamiento con base a resultados obtenidos en la simulación

1.7 Estructura de la tesis

Esta tesis se encuentra dividida en 4 capítulos, los cuales se describen a continuación

- Capítulo 1.- Describe el objetivo de esta tesis, la justificación y todo el preámbulo científico en el cual se basó para justificar la base de la investigación.
- Capítulo 2.- En este capítulo se muestra todo lo relacionado con la teoría que se usa para cimentar los modelos utilizados en esta investigación. Se muestran los modelos matemáticos que justifican las simulaciones y además la metodología que sugiere los pasos a seguir para encaminar dicha investigación.
- Capítulo 3.- Esta etapa se explican los pasos a seguir para desarrollar la investigación y validar todo lo que se ha hecho, basándonos en normas, artículos que sirvieron de base y demás. Todo lo visto en esta etapa tiene que ver con el proceso del desarrollo de la investigación.
- Capítulo 4.- Este capítulo muestra y explica los resultados obtenidos en toda la investigación.

Capítulo 2.- Marco Teórico

2.1 Introducción

2.2 Estudios previos y modelos para la evaluación y simulación de un banco de pruebas hidráulico

2.2.1 Introducción

Lo primero a considerar en un banco de pruebas hidráulico es el uso y aplicación que se le dará, ya que de eso dependen los componentes, consideraciones de diseño y la magnitud del sistema hidráulico. Un banco de pruebas puede ser instalado para probar sistemas de bombeo, sistemas de generación hidroeléctrico e incluso para determinar criterios de diseño y evaluación de redes hidráulicas (tuberías). Teniendo en cuenta el uso, entonces ya se puede definir como se suministrará la energía primaria (recurso hídrico), si será aprovechado de una fuente natural, o se utilizará mediante sistemas de bombeo o canales, esto también está en función del tipo de banco de pruebas que se considere, así como el almacenamiento en caso de que se necesite mucho más recurso del que se tenga disponible. La adquisición de datos o investigación es un trabajo muy importante y fundamental para el proyecto de diseño, comparado con la mediana y gran generación, la colecta de datos para pequeña generación hidráulica presenta características mucho más simplificadas, rápidas, económicas y apropiadas. Cómo sea, estas características de colección de datos no implican complejidad, pero implica un método adaptado justamente al proyecto, para trabajar con características específicas de operación que no implican reproducir lo realizado en un proyecto a mayor escala, sino personalizado [9].

2.2.2 Etapas de la investigación

Para la planeación, la cual debe ser establecida en 2 o 3 etapas y procesos debe conducir a un acuerdo de factibilidad del proyecto [10].

Las siguientes etapas de investigación son de las más comunes y empleadas en este tipo de proyectos de DSMH (Diseño de Micro generación Hidráulica)

1. Nivel de reconocimiento de Proyecto (Preliminar) – Reporte de Prefactibilidad (PFR por sus siglas en inglés)
2. Nivel de Factibilidad Detallado (Pre-Investigación) (DPR por sus siglas en inglés)

2.2.2.1 Nivel de reconocimiento de proyecto (Preliminar) – PFR

A este nivel de investigación, lo siguiente debe ser determinado

- Estudio Técnico de Factibilidad del Proyecto
- Identificación de sucesos críticos y las posibles soluciones

El propósito de las investigaciones preliminares es proveer información suficiente para confirmar la practicidad del proyecto ante cualquier esquema de desarrollo para compararlo ante esquemas alternativos de arreglo que tal diseño preliminar y estimación puedan ser preparadas y de confianza. Estas investigaciones preliminares generalmente deben incluir los siguientes estudios:

- a) Estudios hidrológicos: lluvia en general, corrida de datos, datos del flujo del río o vertiente principal, características de inundación, datos recolectados de sistemas de meteorología nacional, promedios de inundación, esto en caso de SMGH (sistemas de micro generación hidráulica) que obtienen el recurso de cauces naturales, sin embargo, si el recurso es obtenido por otros medios (Sistemas de Bombeo) se debe realizar un estudio previo con los caudales de entrada al sistema de reserva (en caso de contar con uno), una base de datos de la variación del caudal en el transcurso de un año.

En caso de ser un banco de pruebas, las variaciones pueden estudiarse por una semana o un mes, en dependencia del tipo de análisis que quiere obtenerse. En general es trazar curvas de flujo para estimar la utilización del recurso hídrico.

- b) Evaluación de la Demanda de Carga de Potencia: Escenario de potencia de demanda general en el proyecto cercano al área, y las factibilidades existentes de infraestructura para la evacuación de la potencia.

Con este estudio se espera un estudio de reconocimiento que servirá para planear y validar cualquier decisión que pueda tomarse para realizar cambios en el proyecto, así como datos que sean requeridos en la investigación. Dicho estudio está diseñado para reducir el panorama de un proyecto inservible o con fallas, y datos como los que a continuación se listan.

- Definir potencial energético
- Estimar potencia de salida
- Evaluar el potencial de mercado
- Identificar trabajos físicos necesarios
- Desarrollar proyectos hidráulicos e hidrológicos
- Formular y costear proyectos
- Desarrollar una corriente de beneficio de potencia
- Determinar la factibilidad económica
- Identificar problemas críticos, innovación y desarrollo ambiental y social
- Evaluar temas legales e institucionales
- Evaluar sitios específicos y aspectos como tierra, materiales de construcción, etc.
- Evaluar la factibilidad integral como un acceso y la evacuación de potencia
- Evaluar temas financieros
- Documentación

2.2.2.2 Nivel de factibilidad detallado (DPR)

La investigación final comprende la exploración detallada de la recomendación final del sitio (o sitios) en los que será establecido sin variaciones para completar la idoneidad y viabilidad de los diseños finales y la documentación sea preparada con opciones de modificación después de iniciado la construcción del proyecto. La investigación final deberá contener los siguientes apartados de forma clara y detallada:

- a) Estudio Hidrológico: Lo más completo, extenso y detallado posible de los estudios hidrológicos preliminares
- b) Demanda de carga de potencia: Para proyectos conectados a red, la investigación de la locación y la factibilidad del proyecto en la descarga de potencia es requerida

(sistemas de almacenamiento, protección y generación). Para proyectos aislados a la red, la potencia requerida será bajo diseño por demanda, población destino o especificaciones de prueba, tipo de industria de prueba y/o desarrollo, considerando la distancia del punto de generación (cuarto de máquinas) a donde se requiera la energía.

Con la recopilación de las investigaciones anteriores se esperan los siguientes archivos como resultado:

- Características de potencia
- Datos de potencia a la salida nominales
- Recalcular los beneficios de generación
- Costo por generación
- Selección del tipo de proyecto con base a la generación
- Componentes preliminares de diseño con especificaciones
- Costos estimados de proyecto
- Manipulación de la potencia a obtener
- Análisis completo del proyecto en Costo-Beneficio
- Evaluación de los requerimientos financieros
- Administración para permisos en transferencia de carga, conexión a red, aislada o por protección
- Factores ambientales requeridos para la evaluación continua a todos los niveles

Esto determinará el destino del proyecto cualquiera que sea el propósito del desarrollo o los méritos de la investigación.

2.2.3 Investigación de proyecto

2.2.3.1 Investigación hidrológica

Curvas de flujo disponible: El punto más importante y urgente en una investigación hidrológica que debe ser tomado para determinar la corriente o el flujo de agua disponible para generación. Esto generalmente ocurre de mejor forma si se conoce la caída de agua a lo largo de las áreas de captación (en el caso de obtención por fuentes naturales) que, si se analiza por corrientes individuales y ríos, estos estudios preliminares son generalmente colectados durante un año y con sistemas de colección de datos especializados para obtener valores específicos de un área y reales. Por otra parte, si la obtención del recurso es por medio de un sistema de bombeo conectado directamente a un sistema de almacenamiento, entonces se requiere crear una base de datos con los caudales de entrada y salida para la generación, con esto conocer la variación posible a obtener durante las pruebas o evaluación del sistema antes de su puesta en marcha.

Etapas de descarga (Curvas de descarga): El rango total de las condiciones hidráulicas para los cuales se cuentan con varios tipos de estructuras debe ser diseñado de la mejor forma. Estas investigaciones contienen principalmente la determinación natural del nivel de agua, los datos correspondientes a varias descargas para determinar las condiciones del flujo. La determinación de estos datos afecta directamente las condiciones de funcionamiento y diseño del proyecto, en el cual, se diseñará específicamente para las condiciones dadas del flujo.

La mayoría de las estaciones de SMGH son diseñados en corrientes de río o sistemas de regulación (mini presas). Estos tienen diversas formas de presentar soluciones a problemas hidrológicos dados en las siguientes condiciones:

1. Hay datos de flujo con una larga secuencia de observación en el sitio en estudio: esta condición es muy rara para ríos pequeños
2. Hay datos de flujo con una secuencia corta de observaciones en el sitio, complementadas por datos indirectos correlacionados con estaciones de medición de referencia.
3. Ni los datos de flujo en el sitio ni los de la estación de referencia están disponibles

Para la tercera condición, existen cinco métodos principales usualmente adoptados para una solución provechosa: análisis de correlación, analogía hidrológica, síntesis regional, investigación hidrológica y la mezcla de todos los métodos mencionados.

Para los esquemas de flujo de río, especialmente para micro/mini proyectos, puede haber pocos datos disponibles para evaluar el flujo confiable. En tales casos, las observaciones de descarga deben comenzarse de inmediato en un sitio adecuadamente ubicado. La información recopilada sobre esta base debe ser la relación posible. Los pluviómetros considerados deberían estar ubicados preferiblemente en la cuenca cercana a un esquema particular o, en ausencia de dicha ubicación, las estaciones pluviales de la cuenca adyacente deberían considerarse para establecer una correlación adecuada entre la lluvia y la escorrentía.

La medición de descarga en las proximidades del sitio elegido para el plan hidroeléctrico debe tomarse de la manera más precisa posible. Cualquiera de los siguientes métodos puede ser empleado para mediciones de descarga, según se considere apropiado para la ubicación particular.

1. Medición de flujo, estructuras tales como muescas, presas y canales (Ref. IS:1193-1959)
2. Método del área de velocidad (Ref.: IS:1192-1959)
3. Método del área de pendiente (Ref.: IS:2912-1964)

Las mediciones de descarga preferiblemente deben cubrir un período mínimo de dos temporadas de escasez para SMGH. Además de lo anterior también se deben investigar:

1. Sedimento suspendido
2. Niveles de agua de cola
3. Oxígeno disuelto diario y promedio
4. Temperatura del agua, diaria y promedio

2.2.3.2 Investigaciones geológicas

Sobre la base de una travesía geológica del área, se realizará la siguiente investigación geológica mínima:

Estructura de desvío:

Es deseable, con la misma certeza, el tipo de estratos subyacentes a la estructura propuesta por medio de al menos un pozo de prueba en una ubicación adecuada, según lo aconsejado por el geólogo, con la tala geológica. El informe también debe incluir el tipo de estratos de los contrafuertes.

Canal de energía:

Dado que el canal de potencia en un esquema de micro/minihidráulico tiene una sección transversal comparativamente pequeña, es posible que no se requiera una investigación geológica detallada mediante perforaciones / pozos de prueba. Sin embargo, el mapeo geológico de las laderas de las colinas a lo largo de la alineación es esencial para evaluar la estabilidad de las laderas de las colinas, particularmente los tramos donde se detiene la caída del material suelto en el canal, para permitir al diseñador considerar el remedio medidas, como proporcionar conducto cubierto o conducto en estos alcances.

Obras de drenaje cruzado:

Se requiere una evaluación geológica de los estratos, particularmente de los estribos y el lecho del drenaje en el sitio de estructura propuesto. Tal informe ayudaría al diseñador a cuidar los factores geológicos para la base del estribo de la estructura.

Tuberías y compuertas:

Se debe realizar un mapeo geológico de las pendientes de la compuerta. Se debe prestar especial atención a las secciones geológicas en las ubicaciones de los sillines y bloques de anclaje con indicación de los estratos en el nivel de cimentación de la estructura. Un pozo de prueba en la ubicación de la toma y dos o más pozos de prueba en la pendiente de la compuerta con registro geológico pueden ser suficientes.

Cuarto de máquinas:

Un pozo de prueba en el sitio de la casa de máquinas con registro geológico debe llevarse a cabo. En particular, se debe preparar el mapeo geológico de las pendientes de la excavación

de la casa de máquinas, lo que indica la estabilidad de las pendientes de construcción y cualquier característica geológica adversa, de modo que esto podría tenerse en cuenta en el diseño para la estabilidad de las pendientes.

La investigación geológica para pequeños esquemas en caídas de canal puede incluir la evaluación geotécnica del sitio, indicando el tipo de roca, si está disponible, o el tipo de suelo que es probable que se encuentre en el nivel de cimentación de la central eléctrica por pozos de prueba. En el caso de que la roca no esté disponible en el nivel de la fundación, las pruebas de permeabilidad deben realizarse. Se dan en la tabla 2.

2.2.3.3 Investigaciones de demanda de carga

La demanda de carga y la encuesta de mercado son necesarios para evaluar la venta de energía y el análisis financiero del plan. Estos pueden de dos tipos:

- Red conectada/ interconexión a red: las investigaciones involucrarán los detalles de la subestación más cercana para la evacuación de energía sin problemas, su capacidad, la longitud de la línea de transmisión requerida, la tierra requerida, etc.
- Sistemas aislados: se deben trabajar el consumo diario, estacional y anual de las necesidades domésticas / comerciales / comunitarias / industriales y de riego. La curva de carga decidirá el tamaño y la cantidad de unidades.

2.2.3.4 Investigaciones ambientales

1. Efecto de la base y la sumersión después de la creación del depósito
2. Impacto de la deforestación
3. Asustado de desfiguración de los alrededores naturales, especialmente en la región de los pozos de préstamos y sitios de cantera
4. Preservación de reliquias culturales y antiguas
5. Afectar al flujo de la corriente
6. Cambio de la calidad del agua (organizar el contenido de la materia, la temperatura, el concurso de sólidos disueltos, etc.)

2.2.4 Análisis de duración de flujo (Flow duration curve)

Una curva de duración de flujo muestra el porcentaje de tiempo que es igual o menor o mayor que las tasas durante el período de estudio. Los mismos datos también se pueden trazar para mostrar que el porcentaje de tiempo de varios flujos se iguala o se excede. Una curva de duración puede construirse sobre una base débil, mensual o anual. A medida que la unidad de tiempo aumenta, el rango de la curva disminuye. La selección de la unidad de tiempo depende del propósito de la curva. Si se está estudiando un proyecto de desviación sin almacenamiento, la unidad de tiempo debe ser diaria para que se indiquen los flujos mínimos. Para el diseño del yacimiento, el mes del año puede ser suficiente dependiendo del tamaño del yacimiento en relación con el flujo

El principal defecto de la curva de duración del flujo como herramienta de diseño es que no presenta flujo en secuencia natural. No es posible determinar si los flujos más bajos se produjeron en períodos consecutivos o si se diseminaron a lo largo del registro. Las curvas de duración son más útiles para estudios preliminares y comparaciones entre secuencias. Los requisitos de almacenamiento exactos dependen de la secuencia de flujo real y no se pueden estimar con precisión a partir de las curvas de duración.

La forma de la curva de duración del flujo dependerá principalmente de la unidad de tiempo seleccionada (diaria, mensual o anual) y del tipo de flujo (descarga altamente variable, variabilidad de flujo pequeño, llanuras de inundación grandes o flujo base considerable).

La curva de duración puede ser calculada por

- Clasificar la técnica ordenada
- Técnica de intervalo de clase
- Colección de datos por recopilación (Flow Curve)

2.2.4.1 Clasificar la técnica ordenada [11].

Los datos se clasifican según la magnitud (en orden descendente) y la frecuencia de ocurrencia, F_x , viene dada por:

$$F_{x_m} = (m/n)100$$

n = número de registros

m = El orden del número en el rango ($m = 1$ para el valor más alto)

Donde:

F_{x_m} = Frecuencia de ocurrencia

(Porcentaje dependiente del flujo o de la probabilidad de el flujo sea equivalente o excedente)

2.4.4.2 Técnica de intervalo de clase [11].

Un primer paso útil es trazar los datos como un histograma de frecuencia. Esto se hace agrupando los datos en clases y luego graficando un gráfico de barras con el número de frecuencia relativa de observaciones en una clase versus el punto medio del intervalo de clase. El punto medio de una clase se llama marca de clase. El intervalo de clase es la diferencia entre los límites de clase superior e inferior.

Otro método de presentación de datos está en la forma de una distribución de frecuencia acumulativa. Las distribuciones de frecuencia acumuladas muestran la frecuencia de eventos menores que (mayor que) algún valor dado. Se forman sumando las frecuencias relativas y trazando la suma acumulada contra el valor de datos correspondiente. SI las ordenadas se suman desde los valores de datos más pequeños (más grandes) a los valores más grandes (más pequeños), la frecuencia acumulada resultante se refiere a la frecuencia de observaciones menores (más que el valor de datos correspondiente. Los puntos en la curva acumulativa se deben trazar en el límite derecho (izquierdo).

Si la frecuencia relativa de la i -ésima clase del histograma de frecuencia se denota por F_x , entonces una propiedad del histograma es:

$$\sum_{i=1}^k nF_{x_i} = 1$$

Donde k es el número de clases, de forma similar si la frecuencia acumulada al final del intervalo de la i -ésima clase es F_{x_1} , entonces:

$$F_{x_i} = F_{x_i} - F_{x_{i-1}}$$

$i, F_{x_i} = nF_{x_i}, \text{ donde } j = 1$

2.2.4.3 Colección de datos por recopilación anual (Flow curve) [12].

La elección de la turbina implica muchos factores, tales como la velocidad, tamaño y tipo, así como la generación, todo esto basado en el salto total de agua y las condiciones mínimas y máximas de flujo que se tendrá durante el análisis. Esto anterior es necesario ya que, normalmente las plantas hidroeléctricas o los sistemas de generación hidráulica se instalan en ríos, donde la turbina es diseñada a partir del máximo flujo del río, canal o presa. Para medir o determinar el flujo de agua es necesario hacer uso de herramientas de cálculo, modelos matemáticos, mediciones y registros del comportamiento de la energía primaria, para garantizar el óptimo funcionamiento. La curva de duración de flujo nos permite conocer o dar una idea del potencial de generación. Esta curva depende directamente de la obtención del flujo, si es de un depósito que va a ser llenado constantemente para después ser vaciado, entonces el modelo a utilizar es el de carga y descarga, en el cual se considera directamente el tiempo que tarda en llenarse el depósito, en dependencia directa del sistema que suministra el agua. En este diseño se utiliza el modelo de carga y descarga para determinar el tiempo estimado que se tiene para aprovechar el recurso hídrico, primero, la carga, considerando un flujo de entrada variable debido al tipo de suministro que se cuenta.

Las ecuaciones que se utilizan se muestran a continuación.

La altura de elevación que entrega una bomba a un fluido queda determinada por la siguiente ecuación:

$$H = \eta \cdot \frac{P}{\gamma \cdot Q}$$

Donde η es el rendimiento de la bomba, P es la potencia, Q el caudal que pasa por ella y γ el peso específico ($\gamma = \rho \cdot g$).

La velocidad se puede medir mediante un objeto flotante, que se encuentra en el centro del flujo de la corriente. El tiempo (t) en los segundos transcurridos para recorrer una cierta longitud (L) que se registra en el medidor. También puede medirse con un caudalímetro regulado y validar la velocidad con el método del vaciado, que se realiza vertiendo el caudal en un recipiente del cual ya se tiene la capacidad y se comprueba con el tiempo de llenado de este. La velocidad de la superficie (m / s) se da como:

$$Vrs = L/t(l/s)$$

Donde:

$$Vrs = \text{Velocidad del caudal (l/s)}$$

$$L = \text{Longitud(metros)}$$

$$t = \text{Tiempo (segundos)}$$

Para estimar la velocidad de flujo promedio (V_r), el valor anterior se debe multiplicar por un factor de corrección, que puede variar entre (0.6) y (0.85), dependiendo de la profundidad del curso de agua y su rugosidad del fondo y de la orilla del río (0.75 es un valor bien aceptado). Por otra parte, para el PVC, el factor varía desde un 0.62 hasta 1, dependiendo siempre de la temperatura y presión. En este caso, se recomienda utilizar un 0.9 por la temperatura a la que se trabaja, que es temperatura ambiente. Por lo que la ecuación está dada por:

$$Vr = FC * Vrs$$

Donde:

$$Vr = \text{Velocidad de Flujo Promedio (l/s)}$$

$$FC = \text{Factor de corrección (Adimensional)}$$

$$Vrs = \text{Velocidad del caudal (l/s)}$$

Entonces, el caudal se puede calcular como:

$$Q = Ar * Vr(m^3/s)$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal}(m^3/s)$$

$$Ar = \text{Área por donde pasa el flujo (m}^2\text{)}$$

$$Vr = \text{Velocidad de flujo promedio (l/s)}$$

Con esta estimación, podemos conocer el caudal promedio que se tiene en cada sistema de reserva.

Otra manera de estimar el caudal, evaluando para un sistema de depósito ya instalado, del cual se quiera conocer la descarga para elaborar curvas de descarga de flujo para evaluación, es utilizar el teorema de Torricelli, el cual se describe a continuación.

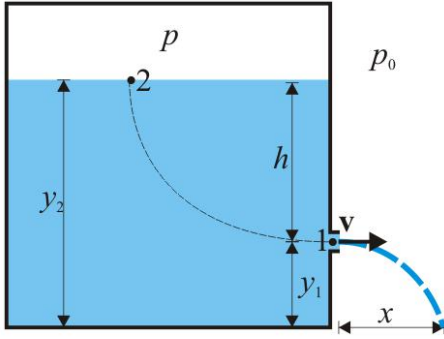


Ilustración 5 Vaciado de tanque

Aplicando el teorema de Bernoulli en los puntos 2 y 1 mostrados en la ilustración 7, podemos describir la siguiente expresión:

$$P_1 + g\rho y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + g\rho y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Donde ρ es la densidad del fluido, P_1 y P_2 son la presión de los puntos 1 y 2 respectivamente. De igual modo la v es equivalente a la v_1 , y tenemos v_2 , que son las velocidades del fluido en los puntos 1 y 2 respectivamente. La presión en la interfase aire-agua superior (punto 2) es la presión atmosférica ($P_{atm} = P_2$). También se supone que es posible identificar P_1 con la presión atmosférica, por ende $P_{atm} = P_2 = P_1$. Por lo tanto, podemos reducir la ecuación antes mostrada como:

$$g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Por otro lado, la ecuación de continuidad (conservación de la masa) conduce a la conservación del caudal, a partir de la cual puede establecerse que:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow v_1 A_1 = v_2 A_2 \rightarrow v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}$$

Si expresamos esta relación en términos de los diámetros respectivos, tenemos:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

Si reemplazamos este valor en la ecuación donde despreciamos las presiones, entonces podemos describir la velocidad de evacuación por la siguiente relación:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g(y_2 - y_1)}{1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4}}$$

Dado el modelo utilizado por Torricelli, en el que suponemos la siguiente aproximación: $d_1 \ll d_2$, por ello $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 = 0$, y evidentemente solo queda el término 1, en el que el divisor es 1, dentro de la raíz, entonces podemos deducir que la velocidad de evacuación queda expresada como:

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)} = v_1 = \sqrt{2gh}$$

Donde la aproximación que resulta se conoce como el Teorema de Torricelli. Dicha aproximación se usa para estimar la velocidad de descarga del depósito considerado.

2.2.4.3.1 Pérdidas en tuberías de carga y descarga por fricción

La fricción contra la pared de la tubería depende de la rugosidad del material de la pared y del gradiente de velocidad más cercano a la pared. El gradiente de velocidad, como se puede ver en la figura 2.1, es mayor en el flujo turbulento que en flujo laminar. Por lo tanto, a medida que aumenta el número de Reynolds, la pérdida por fricción también aumentará en él al mismo tiempo. A mayores turbulencias hay una mezcla más intensa de partículas, y por lo tanto una mayor disipación viscosa. En consecuencia, las pérdidas de energía en el flujo en la tubería aumentan al mismo tiempo que los números de Reynolds y con la rugosidad de la pared del tubo. Se puede verificar que para el agua que fluye entre dos secciones, una cierta cantidad de energía se pierde (hf)

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + h_f$$

Esto debido en primer lugar, a la fricción del agua contra la pared de la tubería, y en segundo lugar a la fricción interna del flujo. En la siguiente figura HGL es la línea del gradiente hidráulico y EGL la línea de gradiente de energía. Si la sección transversal del tubo es constante, $V_1 = V_2$ y ambas líneas serán paralelas, por esto es necesario determinar el valor de hf .

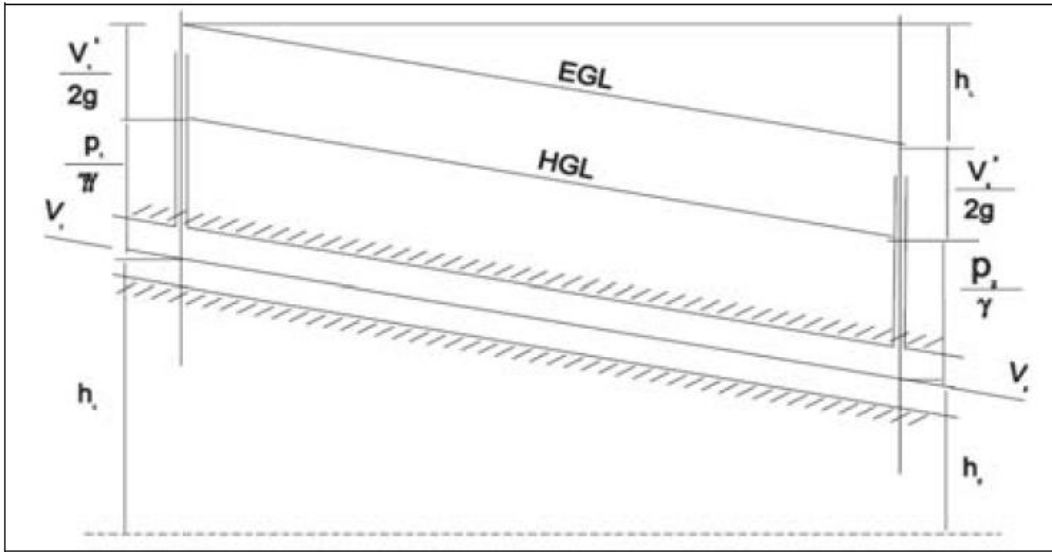


Ilustración 6 Gradiente de Energía y Gradiente Hidráulico

$$hf = f * \left(\frac{L}{D}\right) * \left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

Donde:

hf = Pérdidas por fricción (m)

f = Factor de fricción (adimensional)

L = Longitud de la tubería (m)

D = Diámetro de la tubería (m)

V = velocidad promedio $\left(\frac{m}{s}\right)$

g = Constante gravitacional $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

A continuación, se muestran ejemplos de diversos tipos de curvas de flujo obtenidos a partir de distintas metodologías.

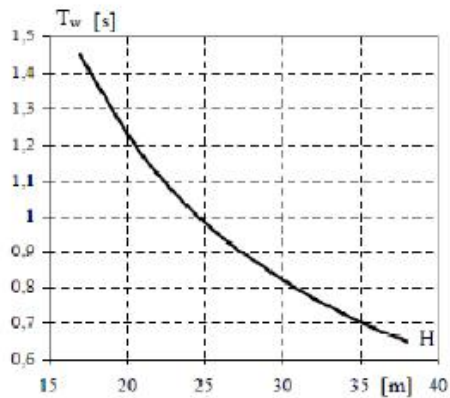


Ilustración 7 Flow Curve de la integral del Tiempo respecto a la variación del flujo en un rango de altura dada

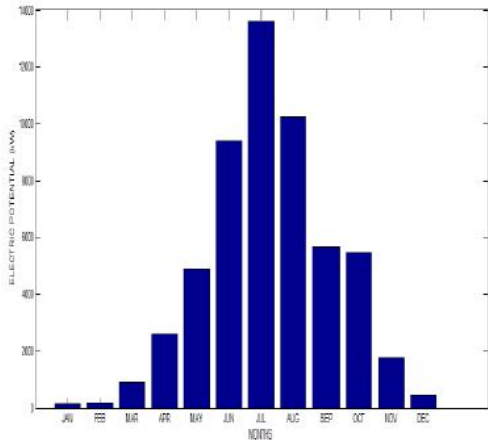


Ilustración 8 Histograma de la variación del flujo durante un año y el potencial estimado

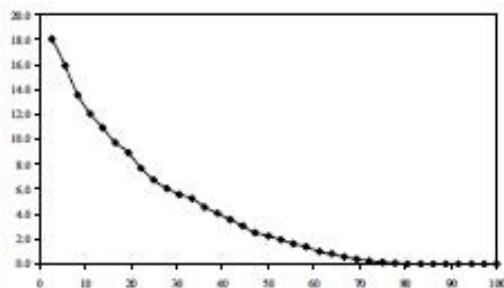


Ilustración 9 Flow curve de la variación del caudal (eje y) respecto al tiempo (eje x)

2.2.4.4 Conclusiones

1. La recopilación de datos es indispensable para el diseño y la construcción de SMGH. Hasta cierto punto, podemos decir que la falla y el éxito de un proyecto de SMGH dependen principalmente de la falla o el éxito de la recopilación de datos.
2. La cantidad de trabajo de recopilación de datos depende del tamaño del proyecto y las condiciones naturales del sitio. Lo que afecta a la recopilación de datos, la mayoría de los aspectos de la cantidad de trabajo y el grado de dificultad son las investigaciones hidrológicas y geológicas.
3. La investigación hidrológica debe realizarse de acuerdo con los requisitos de los criterios de diseño de SMGH, como el estándar de inundación, la confiabilidad de la producción de potencia, los requisitos presentados para el cálculo de escorrentía y los métodos de análisis hidrológico recomendado por las normas.

4. En la región donde no hay datos disponibles para el análisis hidrológico, se debe establecer una estación de calibración provisional al comienzo de las investigaciones para obtener los datos de flujo y precipitación directamente del sitio en estudio, el período de observación es al menos 1- 2 años.
5. Las investigaciones geológicas para SMGH difieren de las hidroeléctricas grandes / medianas no solo en la cantidad de trabajo y depende de la investigación, sino también del método de exploración.
6. Los datos socioeconómicos también son importantes para determinar la capacidad instalada y la generación de energía anual de SMGH. se debe prestar una atención adecuada al impacto ambiental de la construcción de SMGH, especialmente cuando se debe construir una presa en un río.

2.2.5 Componentes principales en un sistema de micro generación hidráulica

2.2.5.1 Introducción

El desarrollo de SMGH es una tecnología bien establecida. Las plantas de energía con un tamaño de unidad de hasta 5MW están diseñadas como pequeños planes hidroeléctricos. La clasificación de proyectos hidroeléctricos se describe en este capítulo al comienzo, en la sección 2.3.1

Los grandes proyectos hidroeléctricos son, por lo general, de uso múltiple, un beneficio combinado del control de inundaciones por irrigación. Los esquemas pequeños de energía hidroeléctrica generalmente son solo para generación de energía de forma económica y fácil.

2.2.5.2 Esquema de los componentes de un sistema de micro generación hidráulica

La mayoría de los proyectos hidroeléctricos en las zonas montañosas de la India son de cabeza alta y cabeza mediana y tienen los mismos componentes básicos y comunes de una cabeza hidroeléctrica. Los principales componentes de un esquema hidroeléctrico se muestran aquí.

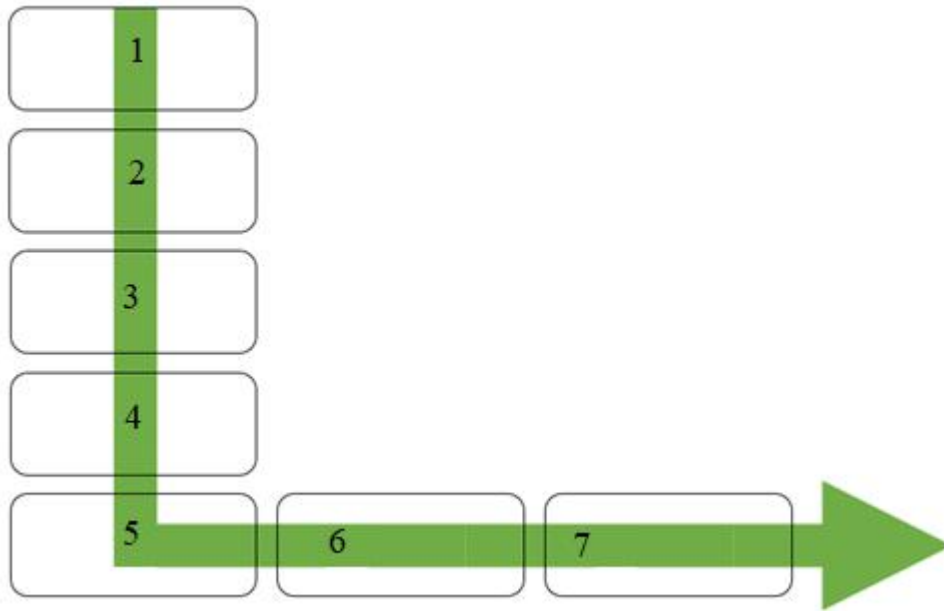


Ilustración 10 Pasos en el diseño de un SMHG

1. Estructura de admisión. Una estructura de admisión es una disposición mediante la cual se desvía el agua para el uso requerido. La toma es una disposición que permite que el agua se tome de su fuente y luego se descargue en el sistema de transporte desde donde se transfiere al uso deseado (por ejemplo, generación de energía hidroeléctrica). También se hacen arreglos para enrutar la descarga de alta inundación.

Según las tomas de los cabezales de operación, las tomas pueden clasificarse como:

- a. Bajo consumo de cabeza
 - b. Consumo medio de cabeza
 - c. Alto consumo de cabeza
2. Sistema conductor de agua
 - a. Canal alimentador. Esto se proporciona desde la entrada al tanque de desoldadura y lleva agua sedimentada. La velocidad en la sección debería ser suficiente para que los sedimentos presentes en el agua no se depositen en el lecho del canal.

- b. Cabeza de carrera. Esto se proporciona desde el tanque de desintegración al tanque de la cámara de carga. Lleva agua libre de limo. Los canales pueden ser de los siguientes tipos.
 - i. Canal Abierto (R.C.C. tuberías de corte y cubierta y de acero se proporcionan en alcances donde las laderas son geológicamente inestables)
 - ii. R.C.C. Cut & Cover/concrete hume pipe
 - iii. Tubo de acero
 - iv. Túnel
 - v. El canal abierto podría ser trapecoidal con forro delgado de hormigón o rectangular con paredes de mampostería o hormigón
 - vi. Para el acceso, la provisión debe hacerse solo para un camino de brida a los costos de las economías, como también para evitar el corte innecesario de las montañas
 - vii. Pérdida de agua debido a filtraciones: se pueden obtener datos sobre los mismos para los esquemas representativos, de modo que se pueda evaluar su importancia
- 3. Sistema de control de sedimentos. El control de sedimentos por excluidores de eyectores se logra utilizando los siguientes dispositivos. El establecimiento de la cuenca es uno de los dispositivos más efectivos para eliminar las partículas de sedimentos del agua que fluye. La reducción en la velocidad del flujo en la cuenca de sedimentación es causada por la expansión de la sección transversal del canal a lo largo de la cuenca. Tal reducción en la velocidad, el esfuerzo cortante y la turbulencia, si es adecuada, detienen el movimiento del material del lecho y también hace que se deposite parte del material suspendido. Una vez que se ha decidido el tamaño mínimo de sedimento a eliminar, el diseño de la cuenca de sedimentación implica la determinación de la profundidad y la longitud de la cuenca y la elección del método de eliminación del material depositado.

4. Tanque o reservorio. El propósito del depósito de tanque / depósito de equilibrio es el siguiente:
 - a. Equilibrar el almacenamiento proporciona un almacenamiento de 1,2 a 4 horas durante las horas pico para suministrar lo mismo durante las horas pico y así cumplir con la demanda variable justificando la economía.
 - b. El tanque de Forebay proporciona una demanda de agua inmediata para arrancar las unidades (capacidad de 2 a 3 minutos) y suficiente sumersión de la admisión de la tubería de fuerza para evitar la formación de vórtices y la entrada de aire.
 - c. Acera lateral adecuada para proporcionar seguridad al sistema igual a la descarga de diseño.

Para estimar la descarga del fluido en un depósito o reservorio, se utiliza el Teorema de Torricelli, que se describió a inicios del tema 2.2.4.3, de este mismo capítulo.

5. Sistema de tuberías. Varios tipos de materiales están disponibles en la actualidad para la fabricación de tuberías que podrían utilizarse como tuberías forzadas para el desarrollo hidroeléctrico en el país. Los méritos y deméritos de estas tuberías varían ampliamente. Para hacer una selección del tipo de tubería que se debe usar para un sitio específico, se deben considerar exhaustivamente varios factores, como costo básico, transporte y montaje, y disponibilidad de material y habilidad, y un análisis comparativo llevará al diseñador a tomar una decisión (Penche, 1988).

2.2.5.3 Diseño de la tubería:

- a) Criterios para diseño de tuberías IS: 11625-1986
- b) Criterios para diseño estructural de tuberías IS: 11639 (Parte II) – 1986
- c) Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas.

d) Instalaciones Hidrosanitarias para la Edificación de Vivienda –
Especificaciones y Métodos de Ensayo NMX-AA-176-SCFI-2015

Con estos criterios y las normas especificadas con anterioridad, se obtienen los modelos matemáticos de análisis para el diseño y análisis de tubería [13].

Pérdidas por diseño red hidráulica

$$h_f = 10.67 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * \left(\frac{L}{D^{4.87}}\right)$$

$h_f =$ Pérdida de carga [m.c.l]

$Q =$ Caudal en la tubería $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$C =$ Coeficiente de rugosidad de la tubería, PVC, 140.

$L =$ Longitud de la tubería de diseño [m]

$D =$ Diámetro de la tubería [m]

6. Los tanques de compensación se requieren para ser provistos en las instalaciones de tubería de la turbina para la regulación de velocidad sobre la siguiente base importante.
 - a. Los tanques de contracción se proporcionan donde la reducción resultante en la presión del martillo de agua proporcionará una instalación más económica de compuerta de la turbina.
 - b. También se proporciona un tanque de compensación para la condición donde el porcentaje calculado del aumento de velocidad basado en el rechazo de toda la carga nominal para una unidad que opera de manera independiente no puede reducirse a aproximadamente el 35 por ciento mediante otros métodos prácticos. Esto es necesario para la unidad hidráulica destinada para operación aislada. El parámetro de aumento de velocidad puede aumentar a aproximadamente 45 por ciento para la unidad diseñada para la regulación de frecuencia del sistema.
7. Cada unidad tiene su propio raid. La sección rectangular con el alcance de la cama según el terreno se proporciona para el canal de la finalización.

8. Cuarto de máquinas.[12]

Diseño

Los siguientes dos tipos de cuartos de máquinas para centrales hidroeléctricas son más comunes:

- a. Plantas eléctricas de poca potencia incorporadas a los sistemas de riego de canales y presas en las llanuras.
- b. Comparativamente plantas de energía de alta / media altura en los valles de montaña en arroyos-ríos-afluentes.

Equipos Auxiliares de Planta de Energía e Instalaciones Anexas

Se debe proporcionar espacio en una casa de máquinas para los siguientes equipos auxiliares y facultades adjuntas

- a. Gobernador de turbina y válvula de cierre
- b. Generador
- c. Transformadores de potencia unitarios y auxiliares
- d. Cubículo de control y equipo de retransmisión
- e. Cubículo de Neutral a tierra y protección contra sobretensiones
- f. estación de batería
- g. sistema de agua de refrigeración
- h. Sistema de drenaje y desagüe
- i. Ventilación
- j. Extintores
- k. Sistema de aire comprimido
- l. Grúas instaladas en el cuarto de máquina

2.2.6 Turbinas hidráulicas

2.2.6.1 Potencia mecánica de las turbinas [14], [13]

Toda la generación hidroeléctrica depende del agua que cae. El flujo de la corriente es el combustible de una planta hidroeléctrica y sin ella la generación cesa.

Con respecto a la trayectoria del agua a través de un canal abierto o tubería forzada, la energía generada en una turbina (pérdida de la energía potencial del agua) se da como sigue:

$$P_t = \rho * H_n * Q * \eta_t$$

P_t = Potencia al eje de la turbina

ρ = Densidad del agua

g = Constante de la gravedad

H_g = Altura Neta

Q = Caudal de flujo

η_t = Eficiencia de la turbina

La eficiencia de la turbina está definida como el ratio de la potencia suministrada por la turbina (potencia mecánica transmitida por el eje de la turbina) a la potencia absorbida (potencia hidráulica equivalente a la descarga medida debajo de la altura total). Como es dado para las turbinas de impulso, la cabeza es medida en el punto de impacto del chorro, el cual está siempre sobre el nivel de descarga de agua. Esto reduce la cantidad de altura. La diferencia no es variable para esquemas de baja altura, donde se compara el funcionamiento de las turbinas de impulso con las de reacción, que aprovechan toda la altura disponible. Para estimar toda la eficiencia del SMGH, la eficiencia de la turbina debe ser multiplicada por la eficiencia del incrementador de velocidad (si hubiera) y el generador.

2.2.6.2 Velocidad de turbinas [13]

Para garantizar el control de la velocidad de la turbina mediante la regulación del caudal de agua, se requiere una cierta inercia de los componentes giratorios. La inercia adicional puede ser proporcionada por un volante, más tarde, cuando se vuelve a conectar la carga, la desaceleración de la inercia de la adición proporciona potencia adicional que ayuda a minimizar la variación de la velocidad. La ecuación básica del sistema rotativo es:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{j * w} (P_t - P_l - B - w^2)$$

$w =$ *velocidad de la turbina*

$P_t =$ *Potencia de la turbina*

$P_l =$ *Potencia de carga*

$B =$ *Coefficiente de fricción de la turbina y generador*

$J =$ *Momento de inercia de todo el sistema rotativo*

Cuando $w =$ *constante*, $P_t = P_l + B + w^2$, dado que $\frac{dw}{dt} = 0$, el sistema es estable. Si P_t es mayor o menor que $P_l + B + w^2$, la velocidad no es constante y el gobernador debe intervenir para que la salida de la turbina coincida con la potencia de salida del generador. La ecuación de movimiento de todo el sistema es una diferencial de primer orden y puede ser resuelta numéricamente utilizando Matlab o Matlab Simulink, o un software de solución similar. Entonces, la velocidad de la turbina en r.p.m. está determinada por:

$$N = \frac{60 * w}{2\pi} \text{ (r.p.m.)}$$

Cualquier turbina con proporciones geométricas similares, incluso si el tamaño es diferente, tendrá la misma velocidad específica (N_s). La velocidad específica será definida por:

$$N_s = \frac{N * \sqrt{P_t}}{H_n^{\frac{5}{4}}}$$

$N =$ *Velocidad de la turbina*

$H_n =$ *Altura neta*

$P_t =$ *Potencia mecánica de la turbina*

La velocidad específica de la turbina constituye un criterio confiable para la selección del tipo de turbina y las dimensiones, después de determinar la velocidad de la turbina, la relación de la caja de engranes con el generador debe ser determinada.

2.2.6.3 Selección de la turbina [12], [13]

Una vez que se conocen la potencia de la turbina, la velocidad específica y la altura neta, se puede calcular el tipo de turbina, las dimensiones fundamentales de la turbina y la altura o elevación sobre la superficie del agua de descarga que la turbina debe instalarse para evitar el fenómeno de cavitación. En el caso del tipo de turbina Kaplan o Francis, la pérdida de carga debida a la cavitación, la cabeza neta y la potencia de la turbina deben recalcularse.

En general, las turbinas Pelton cubren el dominio de alta presión hasta (50 m) para micro hidráulica. Los tipos de turbina Francis cubren la mayor gama de cabeza debajo del dominio de la turbina Pelton con un poco de superposición y hasta (10 m) de cabeza para micro hidráulica. El dominio más bajo de la cabeza por debajo (10 m) está cubierto por una turbina de tipo Kaplan con cuchillas fijas o móviles. Para cabezas bajas y hasta (50 m), también se puede usar la turbina de impulso de flujo cruzado.

Una vez que se conoce el tipo de turbina, las dimensiones fundamentales de la turbina se pueden estimar de la siguiente manera:

Turbinas de Flujo cruzado

$$D_r = \frac{40 * \sqrt{H_n}}{N}$$

Donde:

$D_r =$ Diámetro del rodete

$$L_r = \frac{0.81 * Q}{D_r * \sqrt{H_n}}$$

Donde:

$L_r =$ Longitud del rodete (m)

$$T_j = \frac{0.233 * Q}{L_r * \sqrt{H_n}}$$

Donde:

$T_j =$ Espesor del disparador (m)

2.2 Ensayo para la evaluación de una turbina tipo Michell Banki

Los objetivos principales del ensayo en una turbina hidráulica son los siguientes:

- Estudiar el funcionamiento de una turbina hidráulica de acción bajo condiciones de salto constante y caudal variable.
- Obtener curvas de operación: torque, potencia mecánica y rendimiento en función del caudal.
- Obtener los parámetros adimensionales característicos de las turbinas hidráulicas: coeficiente de caudal, coeficiente de presión, coeficiente de potencia y número de vueltas específico. [15]

Los pasos para el ensayo son:

- 1) Verificar que el nivel de agua en el canal sea el adecuado, en caso contrario, llevar el nivel a la altura del vértice del vertedero. El agua deberá estar libre de impurezas, cambiar el agua si es necesario.
- 2) Regular las escalas de los instrumentos al punto cero, tanto para la medición de caudal como para la medición de la fuerza.
- 3) Cerrar completamente el caudal de distribuidor de caudal de la turbina y abrir totalmente las válvulas instaladas en la tubería de succión y descarga.
- 4) Conectar a la línea de suministro de energía el regulador de velocidad del motor de accionamiento de la bomba centrífuga. Poner en funcionamiento la bomba centrífuga aumentando la velocidad hasta obtener la presión requerida para el ensayo.
- 5) Abrir gradualmente el distribuidor de caudal girando las vueltas necesarias según manda en el protocolo de pruebas, para obtener los valores de caudal necesarios para el ensayo, regulando también la velocidad de la bomba para obtener una presión de entrada constante.
- 6) Verificar la estabilidad de la frecuencia, en el generador.
- 7) Encender las cargas eléctricas correspondientes, para cada valor del caudal, siempre a una presión de entrada constante, para el cual simularemos la demanda de electricidad en una micro central hidroeléctrica.
- 8) Medir la velocidad de rotación en el eje de la turbina.
- 9) Medir la fuerza en el dinamómetro para así poder calcular el torque y así poder calcular la potencia mecánica entregada.
- 10) Medir el caudal, en el vertedero para verificar las condiciones iniciales del ensayo.
- 11) Repetir los pasos del 5 al 10

Los cálculos y gráficos que servirán como base para la evaluación son los siguientes:

- Torque producido en la turbina
- Potencia mecánica desarrollada
- Rendimiento total del grupo generador
- Rendimiento total de la turbina
- Rendimiento hidráulico de la turbina

- La velocidad específica

Se pide graficar al final como base de evaluación:

- Torque vs Caudal
- Potencia mecánica vs Caudal
- Rendimiento total de la turbina vs Caudal

2.4 Simulación de un sistema hidráulico

2.4.1 Análisis de fluidos computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional es una de las alternativas en la solución de problemas que involucran movimiento de fluidos en complemento al enfoque analítico y al enfoque experimental. En general CFD consiste en obtener la solución numérica aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan al fenómeno utilizando técnicas computacionales. Actualmente existe una diversidad de programas especializados que facilitan su aplicación asimismo continúan abiertos una serie de problemas de fenómenos fluidodinámicos que requieren su modelización y simulación numérica. La tendencia en el uso de CFD es creciente y va ligado al desarrollo del hardware, por tanto, el costo relacionado a su empleo es pequeño, en comparación con la alternativa experimental. Por estas razones, el presente trabajo emplea la simulación numérica utilizando el FEM para formular y resolver las ecuaciones que gobiernan al comportamiento de la turbina hidráulica de flujo cruzado. El estudio se realiza bajo las siguientes etapas:

- i. Etapa de parametrización: Se define la formulación matemática del caso, luego se establecen las condiciones iniciales, de contorno y los parámetros que caracterizan al régimen del flujo (propiedades del fluido).
- ii. Etapa de discretización: Constituye el paso de la formulación continua de las ecuaciones gobernantes a la forma aproximada o discretizada de la solución. Se efectúa el mallado.
- iii. Etapa de procesamiento: Empleando FEM se obtienen soluciones numéricas de las ecuaciones gobernantes, mostrando los campos de presión y velocidad.
- iv. Etapa de ajuste: Se examinan los resultados numéricos evaluando su convergencia y dispersión con respecto a la tendencia general del fenómeno, se concluye aceptando o rechazando la solución numérica.
- v. Etapa del post procesamiento: Se evalúan los parámetros relacionados al caso, p. ej. el torque en la turbina, a partir de los campos de presión y velocidad.

2.4.2 Regímenes analizados y ecuaciones gobernantes

Como restricciones del fenómeno se considera el fluido como isotrópico, isotérmico, newtoniano e incompresible, en flujo bidimensional, adiabático e isentrópico. Se considera también que el flujo evoluciona de un estado transitorio a otro permanente para arribar a la solución numérica, en regímenes laminares, de transición y turbulentos. Bajo estas suposiciones, las ecuaciones gobernantes del fenómeno lo conforman la ecuación de conservación de masa y la ecuación de conservación de cantidad de movimiento lineal de Navier – Stokes, la formulación vectorial es:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \\ \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \end{cases}$$

2.5 Conclusiones

Se puede apreciar en este capítulo los diferentes conceptos y modelos que se emplean para poder comprender y resolver de forma correcta nuestra investigación. Es necesario seguir paso a paso estas indicaciones y modelos para poder así desarrollar correctamente nuestra metodología, ya que sin esto es completamente erróneo el camino. [16]

Capítulo 3.- Metodología.

3.1 Introducción

El banco de pruebas a evaluar es un SMGH que aprovecha el potencial hidráulico para poder realizar diversas funciones, entre las cuales destacan:

- Representar las características del potencial hidráulico, determinado por el salto hidráulico y el caudal, y determinar el desempeño de los S.M.H. analizados.
- Estudiar diferentes tipos de bombas fotovoltaicas; determinar su desempeño bajo diversas condiciones de profundidad de extracción y alturas de descarga.
- Establecer procedimientos de evaluación de las tecnologías hidráulicas incorporadas al banco de pruebas que permita establecer esquemas de capacitación de alto nivel en materia de energía hidráulica.
- Determinar las zonas de aplicación de la turbina hidráulica, a partir de las curvas de funcionamiento.
- Exploración de nuevos prototipos desarrollados y evaluación de nuevas tecnologías, en comparación con los modelos de referencia.
- Visualizar el proceso de transformación de energía potencial en energía cinética, así como la transformación de energía mecánica a energía eléctrica.

- Validar los diferentes modelos que expliquen los procesos de transformación energética y en caso de ser necesario establecer un modelo propio.

El banco de pruebas cuenta con una estructura metálica de 30m de altura, en la cual, situados en dos bases ubicadas a 20 y 30m respectivamente, se encuentran los tanques que sirven como reservas de agua para el correcto aprovechamiento del recurso hidráulico, así como un sistema de tuberías interconectadas de 6" y 4" de PVC, y una salida de tubería metálica, que descarga directamente a las turbinas.

3.2 Etapas del proyecto

Para una evaluación de un SMGH ya no se consideran las etapas de reconocimiento y factibilidad detalladas en la metodología según (El autor de la metodología que estoy usando) ya que el banco de pruebas ya está diseñado, por lo tanto, todos los estudios ya se han realizado con anterioridad. Este proceso para la metodología se divide o se compone en dos partes principales:

- Evaluación del banco de pruebas hidráulico
- Implementación de modelos para la caracterización del banco de pruebas

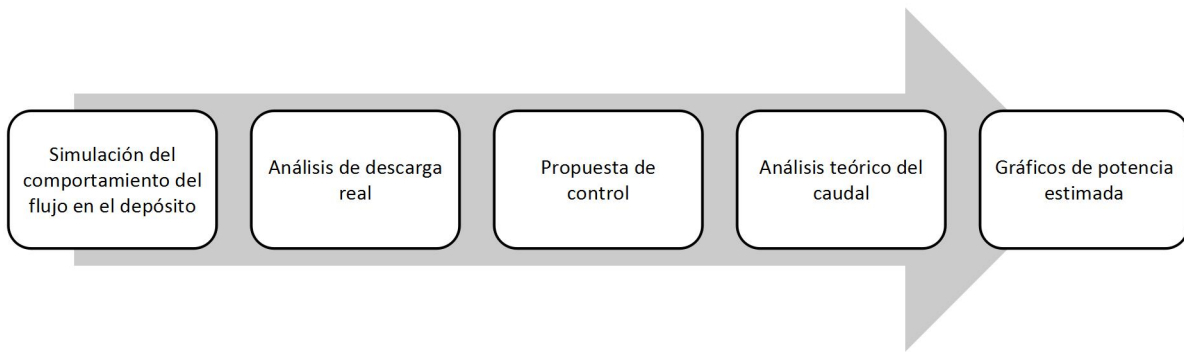
Teniendo en cuenta esto, se procede con la etapa final, la etapa de simulación, que implica conocer el estado en el que debería de funcionar el banco de pruebas hidráulico.

3.3 Evaluación del banco de pruebas

En esta etapa de investigación de proyecto, en lugar de realizar dicha investigación, se pretende escribir los datos generales correspondientes a cada apartado.

3.3.1 Evaluación hidrológica

Curvas de flujo disponible: El recurso hídrico es obtenido de un pozo que se encuentra localizado a un costado de la torre, aproximadamente a unos 5 metros de distancia, del cual se extrae mediante un sistema de bombeo fotovoltaico, obteniendo un caudal de salida máximo de 16.52 l/s y uno mínimo de 4.75 l/s, alimentado por una estación fotovoltaica de 1kW de capacidad instalada. Con base a estos datos, se realizará el análisis de flujo disponible con respecto a el siguiente esquema:



Etapa de descarga (Curvas de descarga): El sistema de almacenamiento del Banco de Pruebas cuenta con dos tanques de reserva de 5000 litros cada uno, con tuberías de salida de 4 y 6 pulgadas respectivamente, que evacúan de forma directa a las dos turbinas instaladas en la base del banco. Los datos de flujo de esta torre hidráulica se obtienen de la siguiente forma

4. Se realiza la carga del recurso hídrico con el SBF (sistema de bombeo fotovoltaico)
5. Se detiene la carga del recurso, se cierran las válvulas de alimentación y se abren las de descarga.
6. Se mide el tiempo que tarda en vaciarse el tanque hasta el punto crítico.
7. Se repite el procedimiento 5 veces para determinar un promedio de descarga y un promedio de carga, validando los resultados esperados por los modelos matemáticos.

Esto es utilizando los métodos que ya se mencionan con anticipación en la metodología, en el capítulo 2.

3.3.1.1 Estructura de desvío:

El recurso hídrico es conducido por una tubería PVC y se realiza el desfogue por debajo del cuarto de máquinas, conduciendo el agua a sus alrededores para una filtración de retorno al pozo.

3.3.1.2 Canal de energía:

No aplica en este proyecto.

3.3.1.3 Obras de drenaje cruzado:

No existe tal.

3.3.1.4 Tuberías y compuertas:

La tubería instalada de PVC de 6 y 4 pulgadas respectivamente es utilizada para la descarga del recurso, mientras que la de carga es tubería de 1 ¼” de PVC.

3.3.1.5 Cuarto de máquinas:

En el cuarto de máquinas se encuentran instaladas dos turbinas hidráulicas. Se seleccionaron dos sistemas, un SMGH Michel Banki y un SMGH. Turgo. Para estos sistemas el fabricante expresa un salto hidráulico y caudal específico para cada sistema, mismos que serán representados físicamente en el Banco de Pruebas para el adecuado funcionamiento de los sistemas micro hidroeléctricos, siendo estos:

Tipo de S.M.H.	Potencia	Salto Hidráulico	Caudal
Michel Banki	5 kW	30 mts.	40 Lts/s
Turgo	3 kW _w	18 - 20 mts.	30 Lts/s

3.3.2 Evaluaciones de demanda de carga

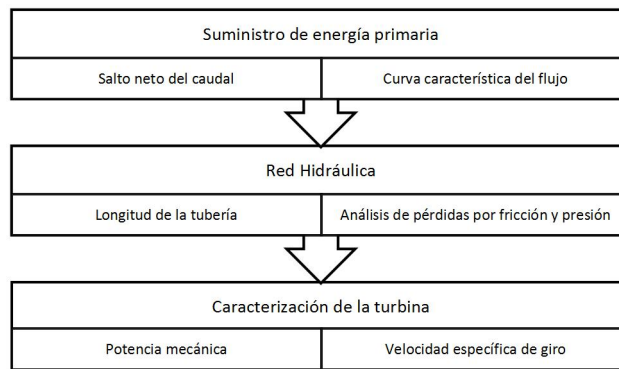
El sistema de generación es un sistema aislado compuesto por dos generadores, cada uno correspondiente a su respectiva turbina, en la cual, la energía eléctrica es canalizada en una resistencia, que se regula por un sistema de control.

3.3.3 Evaluaciones ambientales

1. Efecto de la base y la sumersión después de la creación del depósito (Ninguno)
2. Impacto de la deforestación (No Existe)
3. Asustado de desfiguración de los alrededores naturales, especialmente en la región de los pozos de préstamos y sitios de cantera (No Existe)
4. Preservación de reliquias culturales y antiguas (No se ve afectado ninguno)
5. Afectar al flujo de la corriente (Variación que proviene el pozo, pero el recurso es parte de un ciclo de abasto sin afectar o comprometer la integridad del mismo)
6. Cambio de la calidad del agua (organizar el contenido de la materia, la temperatura, el concurso de sólidos disueltos, etc.) (No aplica)

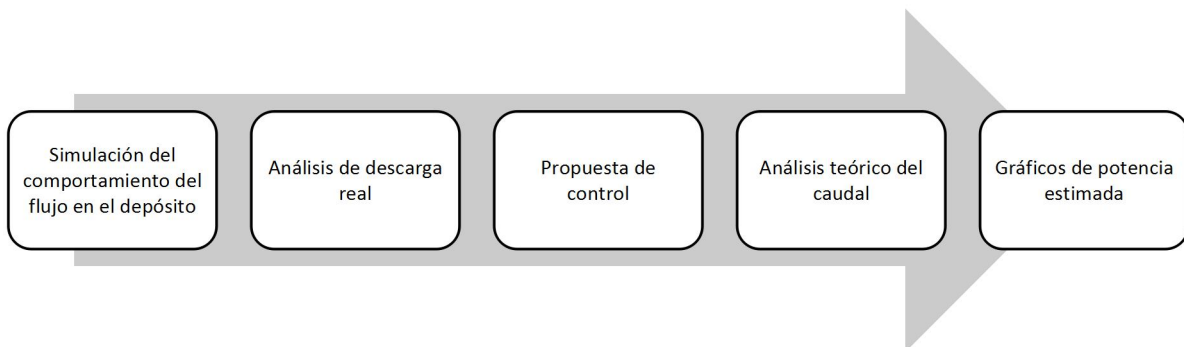
3.3.4 Esquema para el análisis

De forma general, el modelo se puede representar bajo el siguiente esquema:



En el cual, se puede observar que lo primero es asegurar el suministro de energía primaria, ya que es indispensable conocer el caudal porque con estos parámetros se determina todo lo relacionado con el diseño. Para ello, el suministro de energía primaria queda organizado de la siguiente forma:

De forma individual, la primera etapa del análisis queda de la siguiente forma:



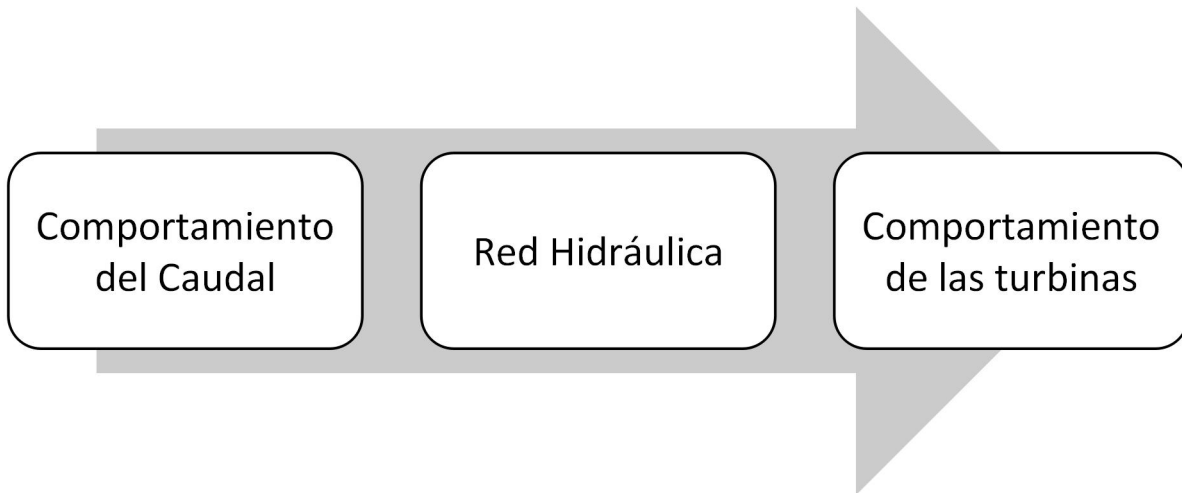
En la cual, para la simulación del comportamiento del flujo, se consideran los datos de entrada conocidos en el sistema, que son: la capacidad del depósito, velocidad de flujo de entrada, de salida y diámetros de tubería de salida y, de entrada.

El análisis de descarga real se da después del llenado del depósito, cronometrando el tiempo en el que se descarga completamente el depósito para comparar el tiempo estimado en el modelado contra la descarga en tiempo real.

La propuesta de control incluye la simulación de una válvula que se mantiene abierta mientras el depósito se está llenando y se cierra cuando el depósito alcanza una altura dada.

El análisis teórico del caudal nos permite conocer durante que lapso de tiempo se puede utilizar el recurso hídrico y qué potencia podemos obtener, así como observar las curvas de comportamiento dado en el sistema.

En la segunda etapa del análisis, se puede utilizar el siguiente esquema, considerando ya dentro la distribución del sistema hidráulico y el análisis de las turbinas.



En el comportamiento del caudal, se debe estimar ya el caudal considerado desde el principio, la variación que se puede tener respecto al sistema de distribución y los valores máximos y mínimos. Esto para conocer los valores de caudal que se tienen durante toda la red hidráulica, en la cual ya se consideran las pérdidas por fricción y se obtiene la longitud total de la tubería instalada. Por último, estos valores se usan directamente en los modelos seleccionados para el tipo de turbina dada que tenemos y se considera tanto la potencia de la turbina como la velocidad de giro.

3.4 Análisis de duración de flujo (Flow duration curve) para el modelado y simulación

En este diseño se utiliza el modelo de carga y descarga para determinar el tiempo estimado que se tiene para aprovechar el recurso hídrico, primero, la carga, considerando un flujo de entrada variable debido al tipo de suministro que se cuenta. Esta etapa se divide de la siguiente forma:

- Colección de datos por recopilación anual (Flow Curve)
 - Datos del suministro
 - Análisis de Carga
 - Datos del depósito
 - Análisis de descarga

- Pérdidas en tuberías de carga y descarga por fricción
- Análisis de resultados

3.4.1 Colección de datos por recopilación anual (flow curve)

Para la recopilación de datos en este sistema, se optó por el análisis de carga y descarga de los reservorios, la carga mediante el sistema de bombeo fotovoltaico y el registro de las mediciones dadas para conocer los caudales promedio variando el número de módulos fotovoltaicos. Consecuente a esto, se hace un análisis del sistema de descarga, el depósito o reservorio en caso de que exista o se utilice y se estima entonces mediante los gráficos la conveniencia de los sistemas de carga y descarga y la viabilidad, así como la factibilidad del método.

3.4.1.1 Datos del suministro

El recurso primario se extrae de un pozo ubicado a 3 metros de la torre hidráulica, con una profundidad de pozo de 60 metros, que se reduce a un aprovechamiento de 30 metros debido a un sismo que provocó el colapso interno del pozo. La extracción del recurso se realiza con la siguiente bomba, las características se muestran a continuación

Ilustración 11 Ficha técnica de la bomba sumergible a utilizar

Specifications			
Product name	SQF 5A-7	Liquid	
Product No	95027342	Pumped liquid	Water
EAN number	5700834760310	Maximum liquid temperature	40 °C
		Liquid temperature during operation	20 °C
		Density	998.2 kg/m ³
Technical		Electrical data	
Stages	7	Motor type	MSF3
Approvals on motor nameplate	CE,RCM,EAC	Power input - P1	1.4 kW
Approvals on pump nameplate	CE,EAC	Rated voltage ac	1 x 90-240 V
Pump No	95027393	Rated voltage dc	30-300 V
Valve	pump with built-in non-return valve	Rated current	8.4 A
		Power factor	1.0
Materials		Rated speed	500-3600 rpm
Pump	Stainless steel	Start. method	direct-on-line
Pump	DIN W.-Nr. 1.4301	Enclosure class (IEC 34-5)	IP68
Pump	AISI 304	Insulation class (IEC 85)	F
Impeller	Stainless steel	Motor protec	Y
Impeller	DIN W.-Nr. 1.4301	Thermal protec	internal
Impeller	AISI 304	Length of cable	2 m
Rotor	DIN W.-Nr. 1.4301	Motor No	96275336
Rotor	AISI 304	Udc	300 V
Stator	DIN W.-Nr. 1.4301	Udc	30 V
Stator	AISI 304		
Installation		Others	
Maximum ambient pressure	15 bar	Minimum efficiency index, MEI =	0.56
Pump outlet	Rp 1 1/2	Net weight	9.58 kg
Minimum borehole diameter	102 mm	Gross weight	10.7 kg
		Shipping volume	0.028 m ³
		Sales region	Europe/South America/Japan

3.4.1.2 Determinación del análisis de carga

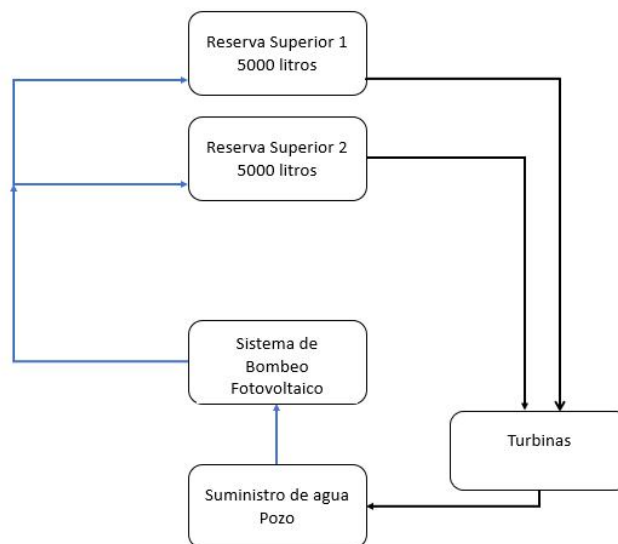
En la carga del sistema, se emplea como ya se mencionó con anticipación, una Bomba sumergible Grundfos Tipo SQFlex A-7, conectada a una central fotovoltaica de 1kW de capacidad instalada. La red hidráulica de carga es de PVC de 1 ¼” de diámetro, con una salida de caudal a boca de pozo de 16 a 30 l/s, y una carga dinámica que disminuye el flujo de 4 a 20 l/s a una altura de 20 y 30m de la torre. Los registros de la medición se llevaron a cabo con un caudalímetro del tipo horizontal, colocado de primera instancia a boca de pozo, a los 10, 20 y 30m de altura de la torre, para poder comprobar la velocidad del flujo y la velocidad debido a la carga dinámica que se somete el flujo. Todo esto para valorar y corroborar las estimaciones hechas con el modelo.

3.4.1.2.1 Determinación de las pérdidas en tuberías de carga por fricción

Para determinar las pérdidas ejercidas en la tubería de carga por fricción, se emplea la ecuación de Pérdidas, que se muestra a continuación, esta ecuación se obtiene del modelo de Darcy para pérdidas en tuberías, y es la que se recomienda en la NOM-006-ENER-2014 utilizar para evaluar este tipo de sistemas

3.4.1.3 Determinación del análisis de descarga

Para el análisis de la descarga se presenta el esquema de funcionamiento y componentes de nuestro banco de pruebas hidráulico, el cual se muestra a continuación:



En el cual, como se puede observar en la figura anterior, nuestro sistema de carga es el Sistema de Bombeo Fotovoltaico, el cual ya fue detallado en el tema anterior. Consecuente a esto, contamos con dos reservorios con capacidad máxima de 5000 litros cada uno respectivamente, en el cual se cuenta con una tubería de desfogue de PVC hidráulico de 4 y 6” de diámetro respectivamente, las cuales se conectan a las turbinas directamente y se recircula el agua directamente al pozo. Esto para no comprometer la integridad de nuestras pruebas. Esta prueba se realiza de forma manual, directamente la descarga de los reservorios, al mismo tiempo que se utiliza el modelo de Torricelli para validar y aproximar el tiempo de descarga.

3.5 Análisis y determinación de los componentes principales del sistema de micro generación hidráulica para el modelado y la simulación

3.5.1 Introducción

Este banco de pruebas cuenta con un sistema de circulación cíclico, a como se muestra a continuación, en el siguiente esquema:

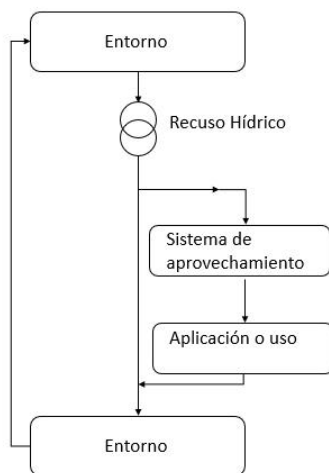
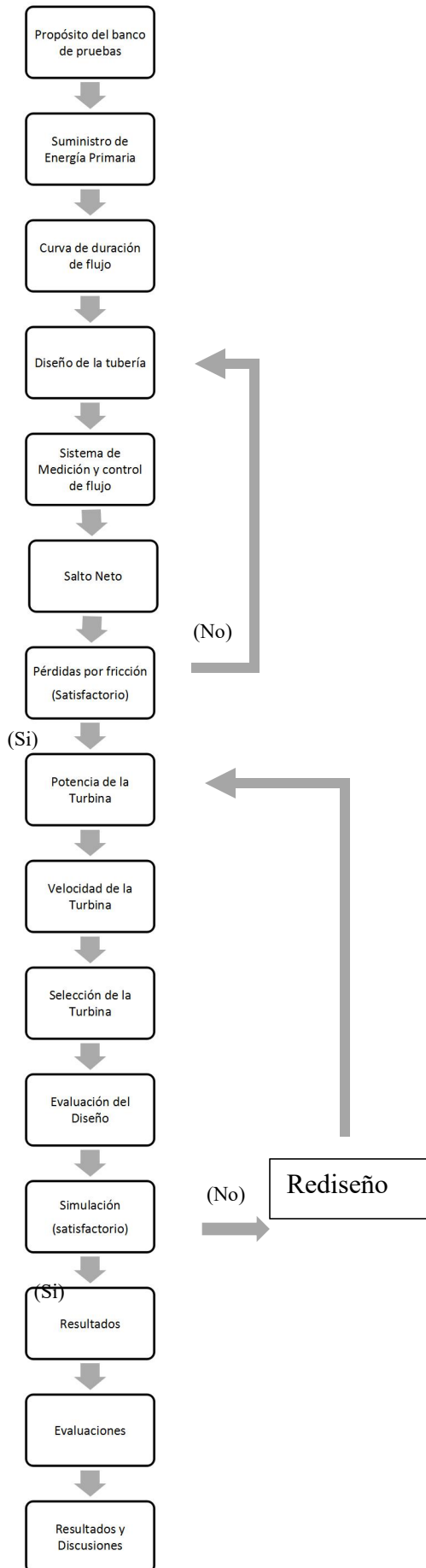


Ilustración 12 Esquema de funcionamiento del banco de pruebas

Del cual, el recurso hídrico se obtiene del entorno, el agua circula a través de una red hidráulica en donde es conducida a un sistema de aprovechamiento (turbinas hidráulicas) y esta energía contenida en el agua es transformada en energía eléctrica para su aprovechamiento, que en el caso de este banco de pruebas es completamente para pruebas

de funcionamiento de las turbinas hidráulicas, sistemas de bombeo fotovoltaico y suministro hidráulico.

A continuación, se presenta el esquema de cómo se evalúa este Banco de pruebas, siguiendo los pasos sugeridos en la metodología utilizada.



3.5.2 Determinación y análisis de los sistemas de generación hidráulica (turbina)

Como bien se sabe, la turbina que se analiza en este proyecto de investigación es una turbina de flujo cruzado tipo Michell Banki. Los datos de la turbina se muestran a continuación:

Datos	Valor
Generación:	8 y 5kW, dependiendo la conexión del generador.
R.P.M.	2600
Corriente de salida	Alterna

3.5.2.1 Determinación de la potencia

Como primer paso, es necesario estimar la potencia hidráulica que podemos aprovechar de las turbinas, para esto es necesario calcular la potencia mecánica, hidráulica y la eléctrica que viene delimitada por el generador, todo esto en consideración con los caudales de salida que se obtienen del análisis previo de caudal. Que oscila entre los 4 y los 16 litros por segundo. Esta simulación se realiza con las ecuaciones de potencia ya descritas en el capítulo 2.

3.5.2.2 Determinación de la velocidad de giro

Para la segunda etapa del análisis de las turbinas, se analiza la velocidad de giro dada para las potencias obtenidas, es necesario considerar que los resultados a obtener deben coincidir con las mediciones que se presentan en el trabajo que antecede a esta investigación. Este análisis se valida con gráficos utilizando la ecuación que se menciona en el capítulo 2, en la sección correspondiente.

3.5.2.3 Determinación de la eficiencia

Por último, se evalúa la eficiencia de las turbinas y se estima, todo respecto al caudal y el aprovechamiento que se tiene en la potencia obtenida en la estimación para el banco de pruebas.

3.6 Simulación del banco de pruebas hidráulico

Para la simulación del banco de pruebas, se emplea un modelo en un software libre, del tipo CFD, Free Fem, en el cual se utiliza como base la turbina Michell Banki con un caudal

constante y con un flujo diferente (considerando lo que debería utilizarse) para verificar que no sea un sistema sobredimensionado. Para esto se supone un caudal de diseño con base a las medidas de la turbina.

3.7 Conclusiones

Estos pasos se siguieron para poder dar a conocer los resultados del siguiente capítulo, en el cual se van a mostrar los análisis realizados, así como validar cada uno de los puntos mencionados con anticipación. La metodología sirvió para guiarse de forma correcta en la ejecución del proyecto.

Capítulo 4.- Resultados

Es necesario comprender un sistema desde sus raíces, y, por ende, saber en qué condiciones se encuentra. Esto con el fin de mejorarlo para poder implementar su tecnología en diferentes lugares y replicar el proyecto, beneficiar a muchas más personas y promover el uso de la energía limpia desde sus diversas ramas como lo son la hidráulica, fotovoltaica, eólica y demás.

El procedimiento de diseño en la micro generación hidroeléctrica se implementó en Excel, después de introducir los datos de las mediciones realizados en el sitio y los cálculos de entrada al programa computarizado (Excel) que se mostrarán en cada una de las gráficas. Para comenzar, se muestra a continuación la descripción nuevamente del modelo matemático.

4.1 Evaluación del banco de pruebas

Para la evaluación del banco de pruebas se ha considerado un caudal variado desde los 4 hasta los 16 l/s. Los datos de entrada, valores de evaluación que se han tomado como base son los siguientes:

Datos	Valor	Unidades
Longitud de la tubería	60	Metros
Altura depósito 1	30	Metros
Altura depósito 2	20	Metros
Capacidad depósitos	5000	Litros
Diámetro tubería de carga	1	Pulgada
Diámetro tubería de descarga	4	Pulgadas
Caudal mínimo	4	l/s
Caudal Máximo	16	l/s

4.1.1 Evaluación del suministro de Energía Primaria

En la evaluación del banco de pruebas, se analiza principalmente el suministro de energía primaria, que se da por la Bomba Sumergible tipo Grundfos SQ Flex A-7. El cual se realizó por semanas durante los respectivos meses que se muestran en la siguiente tabla.

Meses	Caudal (l/s)				Módulos
Mes 1 Sep	13.06	14.06	14.9	15.06	2
Mes 2 Oct	15.12	15.68	20.7	20.32	4
Mes 3 Nov	19.92	22.32	19.86	18.58	6
Mes 4 Dic	18.92	25.62	23.86	23.6	6
Mes 5 Dic 2	28.58	26.96	29.13	28.22	8

Las mediciones realizaron cada mes, empezando con 2 módulos conectados en serie, de ahí fue subiendo de par en par, hasta completar los 8 módulos utilizados. Estas mediciones se realizaron todos los días, de lunes a viernes por las 4 semanas correspondientes a cada mes, de este total de mediciones se obtuvo un promedio mensual que se muestra en la tabla anterior. Estas mediciones se realizaron para evaluar el sistema de bombeo del cual se obtiene el caudal para poder evaluar el sistema de generación de potencia, esto con el fin de conocer el comportamiento de la bomba con respecto al sistema de suministro.

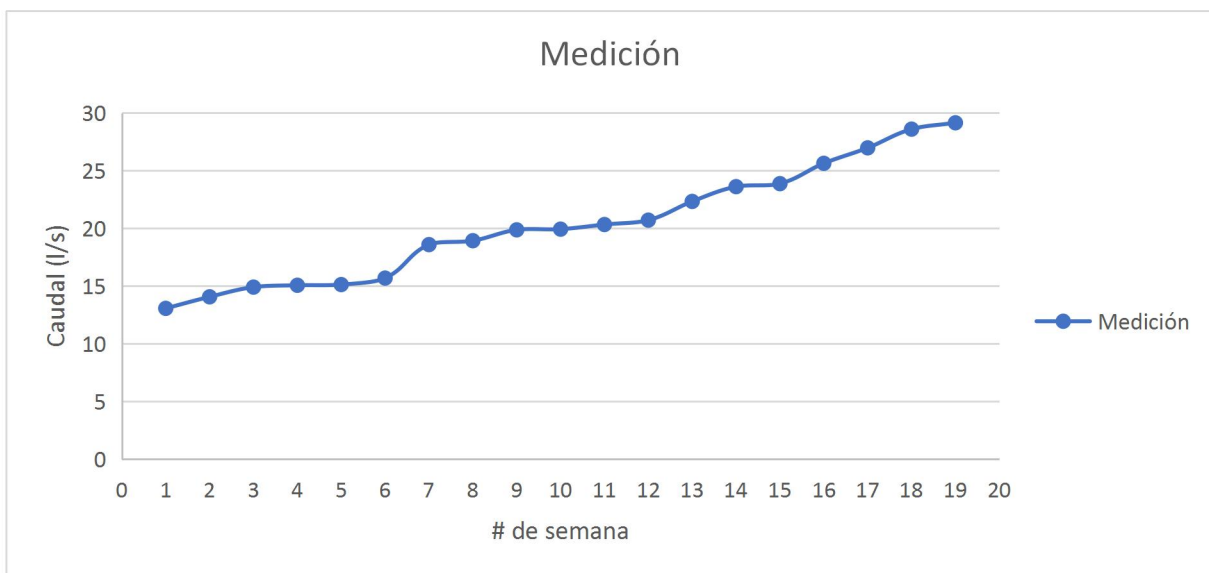


Gráfico 1 Evaluación general del caudal, curva de flujo dado.

Estas mediciones se realizaron para evaluar el sistema de bombeo fotovoltaico que servirá como suministro del recurso primario para el banco de pruebas.

En el caso del sistema de suministro, se obtienen los siguientes resultados:

Determinando la altura de elevación que genera la bomba por cada caudal y graficando estos valores, en el caso de cerrar la válvula aguas abajo, que pareció tener un comportamiento más ordenado, se obtiene la curva característica de la bomba, y

aproximando con una polinómica de grado 2, se obtiene una ecuación aproximada para la curva.

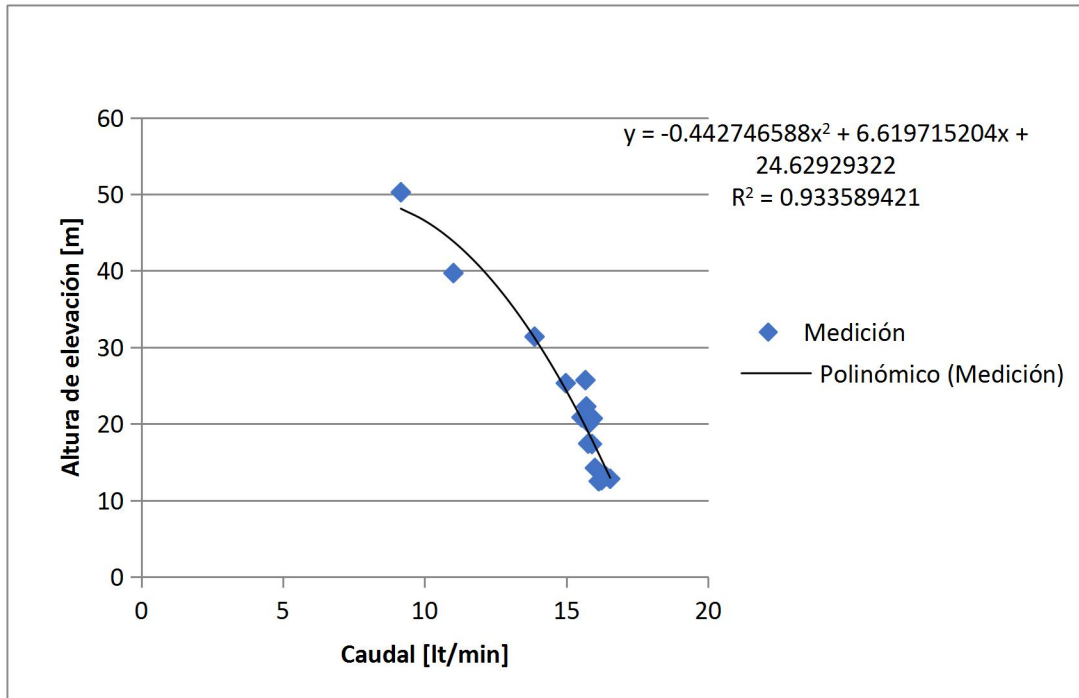


Gráfico 2 Evaluación de la bomba utilizada para suministrar el recurso primario

Se puede notar que en efecto las mediciones sí se pueden aproximar de una forma cuadrática, dado que el factor R^2 es cercano a 1, sin embargo, la ecuación no cumple con la forma común $H = a \cdot Q^2 + b$. Y si bien las unidades de caudal no calzan con las de altura de elevación, estas medidas sí fueron tomadas al momento de calcular la altura, por lo tanto, el factor de corrección de unidades se encuentra inmerso en los coeficientes de la aproximación.

4.1.2 Análisis de pérdidas por fricción

Para el análisis de pérdidas por fricción, se considera el modelo de Darcy, que se muestra en el apartado 2 y 3. Estas pérdidas se dan por el incremento en la longitud de tubería que se consigue por el exceso de accesorios, lo cual provoca un frenado en el flujo y lo vuelve turbulento, aumentando la presión en las paredes de la tubería.

Estos accesorios amplían la tubería hasta un 100% más del diseño original, ya que su recorrido neto es de un estimado de 64m. Dado que esta evaluación no se puede realizar con un instrumento ya que no se cuenta con él en el centro de investigación, basándonos en la norma NOM-004-ENER-2014, que permite evaluar un sistema de bombeo hidráulico mediante la ecuación de pérdidas que ya se presentó en el apartado del marco teórico. Esta evaluación se muestra en el gráfico 7.

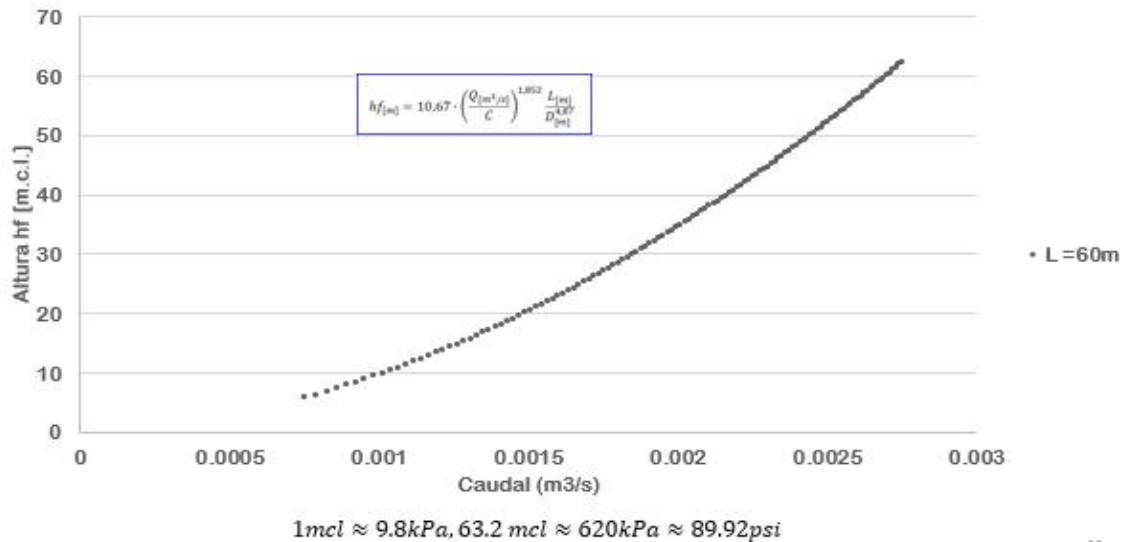


Gráfico 3 Evaluación de la presión ejercida en la tubería del banco de pruebas

Como se observa, se toma como base una longitud de diseño de 60m (la que ya se cuenta en el banco de pruebas), que se emplea para realizar el análisis por fricción, esto para un caudal de salida de 16 l/s, que es un estimado de la descarga en tiempo real del sistema. Lo que provoca a la salida, una presión ejercida en las paredes de la red hidráulica de aproximadamente 90 psi, que como bien ya se muestra en esta investigación, la presión máxima soportada en tubería PVC de 4" que es la que se está utilizando, es de 100 psi, lo cual provoca que en la tubería existan fugas en los extremos o uniones por exceso de presión, que resulta en una caída de presión al final, en la turbina y esto provoca una caída en la potencia. Si se reduce la longitud por accesorios, se lograría un flujo mucho más laminar, que conlleva a una menor presión. Este cálculo se puede observar en las siguientes gráficas, que son la simulación con menor longitud.

Lo cual provoca que el caudal final disminuya una cantidad significativa, afectando de forma directa el proceso de carga provocando un llenado de aproximadamente 4 horas.

4.1.3 Evaluación del sistema de turbinas

En el caso de las turbinas, como bien ya se explicó, los datos que se evalúan primeramente son la potencia de la turbina, las revoluciones por minuto y la eficiencia.

A continuación, se muestran los gráficos de las evaluaciones con los datos de entrada ya especificados, que son los que se obtuvieron del análisis del banco de pruebas de forma inicial.

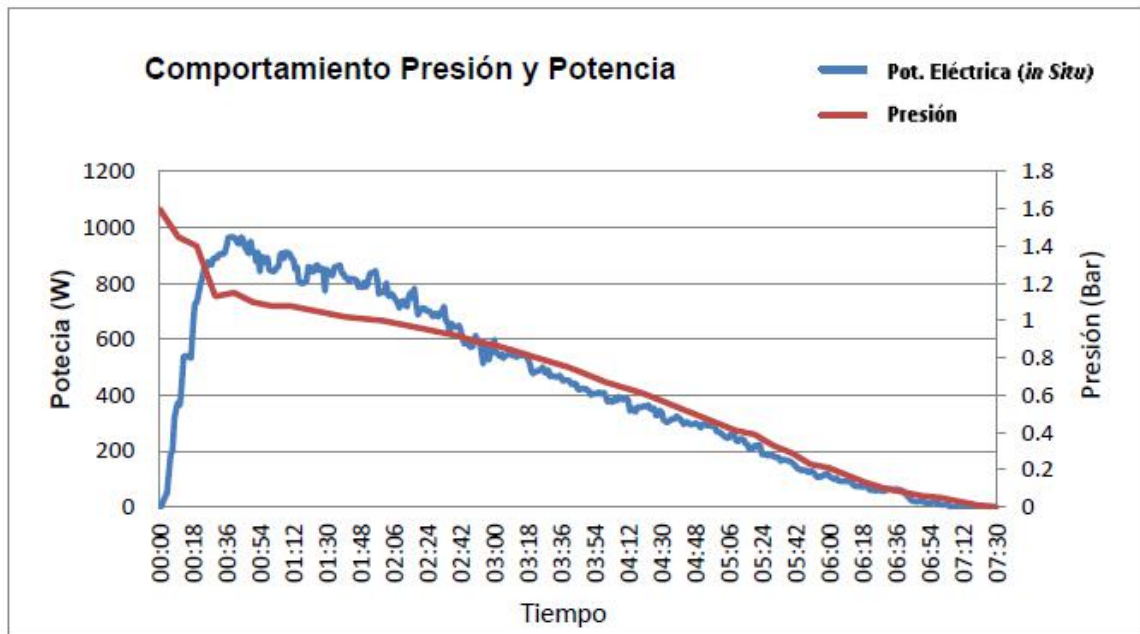


Gráfico 4 Evaluación in situ de la turbina

Que como se puede observar, se tiene una caída de potencia respecto a la variación del caudal y la presión dada en un intervalo de tiempo específico, que no supera los 7 minutos con 30 segundos.

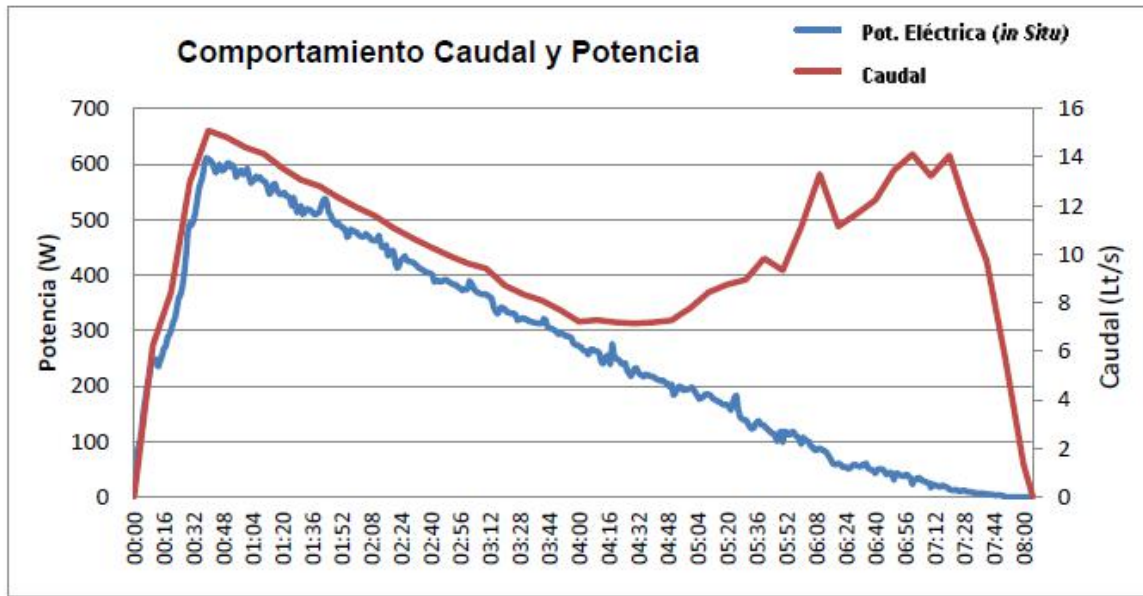


Gráfico 5 Comportamiento Caudal, potencia respecto al tiempo

De la evaluación del caudal respecto a la potencia, también se observa la misma caída, esto debido a la disminución del caudal respecto al tiempo.

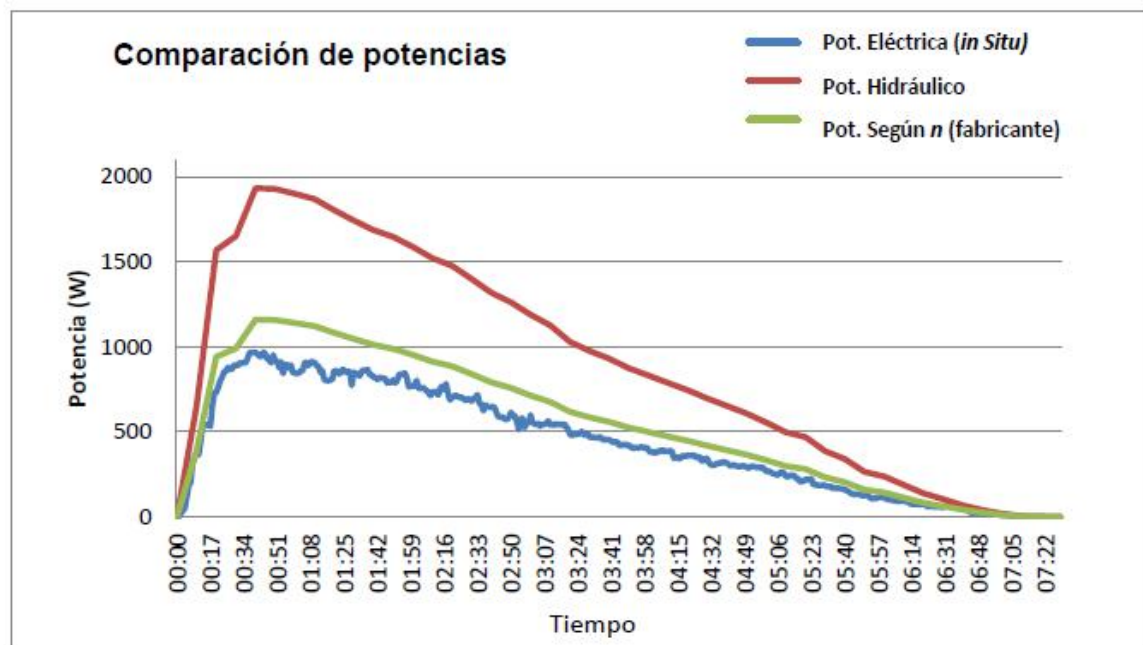


Gráfico 6 Gráfico de potencias dadas

Es lógico entender que también ocurrirá lo mismo con la potencia hidráulica, el potencial de la turbina y la potencia utilizando la ecuación según fabricante, ya que esta depende directamente del caudal, como ya se ha expresado en el marco teórico.

4.2 Validación de los modelos matemáticos aplicados a la evaluación y Rediseño del banco de pruebas

4.2.1 Validación de los modelos

A continuación, se realiza la simulación de los resultados observados en la evaluación, pero con los modelos matemáticos propuestos para el rediseño y la simulación, todo esto para validar los resultados esperados con simulación aplicada a la mejora y comparar con los datos de los gráficos en la evaluación, validando así el margen de error que se puede esperar.

De primera instancia, se validarán los modelos con los datos actuales del sistema, sin mejoras o propuestas de rediseño, posterior a los criterios para rediseño, se propondrá ya en la etapa de simulación, los resultados de los modelos con las mejoras.

Datos de entrada para las validaciones:

Dato	Valor	Unidades
$Q_{inicial}$	16	l/s
Q_{final}	4	l/s
H	20, 30	m
L	60	m

4.2.1.1 Validación del modelo para la potencia en la turbina

Aplicando la ecuación de potencia, se obtiene el siguiente resultado con el modelo de potencia, respecto a los datos de entrada.

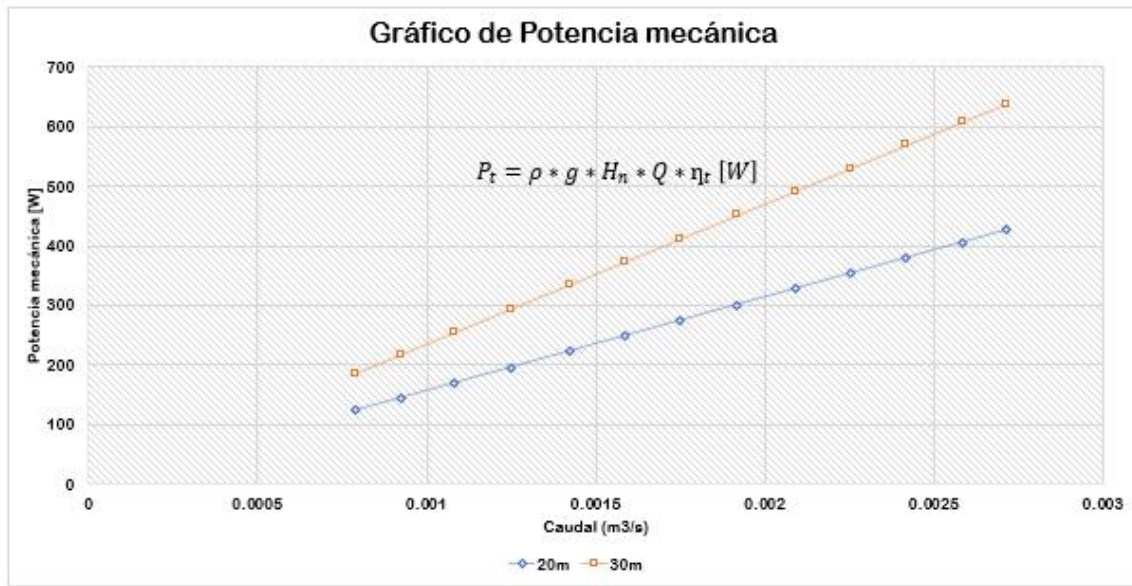
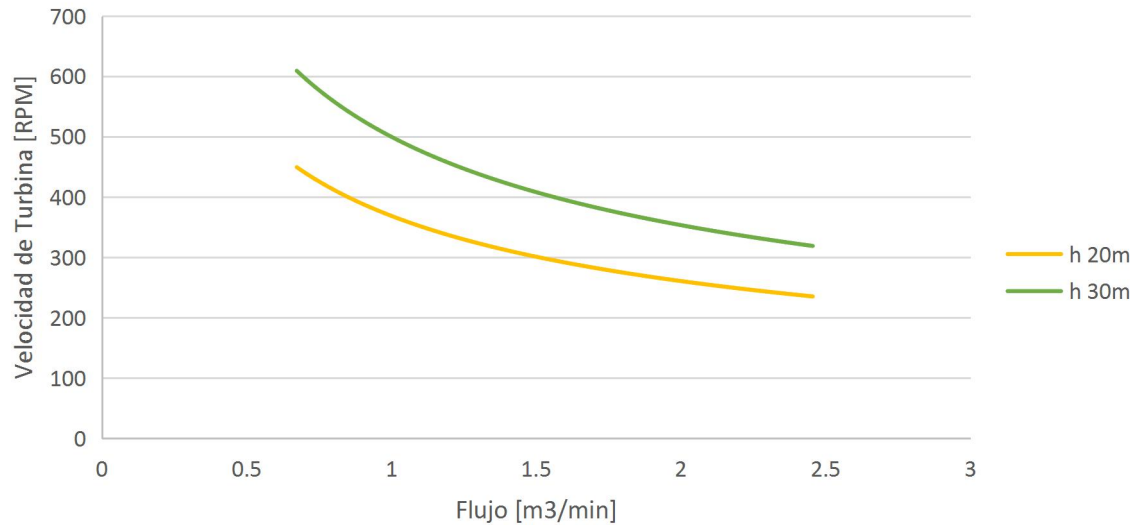


Gráfico 7 Variación de la potencia respecto al caudal

Como se puede observar en la gráfica 5, el caudal máximo obtenido alcanza los 700 watts y este valor se compara con el modelo para la validación, que también el valor máximo a un caudal aproximado de 16 l/s, por lo que el modelo puede ser aplicado a la simulación.

4.2.1.2 Validación del modelo para la velocidad de giro

Con la ecuación de la velocidad de giro, considerando el mismo caudal base y la potencia que se obtuvo en el gráfico 7, se procede a validar el modelo de la velocidad de giro. Es necesario considerar que, en esta validación, la velocidad de giro no logrará acercarse a la velocidad nominal de la turbina, que es de 2400RPM, pero que esta velocidad si deberá aproximarse o igualarse en el mismo modelo, pero ya considerando las mejoras propuestas.



Como era de esperar, en este modelo se cumple que, con la variación de la potencia y la caída de caudal, se tenga una variación en la velocidad de la turbina que no alcanza ni el 50% de la velocidad nominal correspondiente.

4.2.2 Propuesta de rediseño

Como se puede observar en los resultados, el caudal es la parte más importante en la generación, ya que de este parámetro de entrada dependen directamente todos los valores de salida, el análisis fundamentalmente centra su diseño en esto.

El banco de pruebas en sí, como objeto o entidad mecánica es necesario también realizar modificaciones pertinentes, las cuales se detallan a continuación:

4.2.2.1 Estructura

Para la estructura, es necesario realizar mejoras de ingeniería, colocando algunos tornillos en espacios vacíos, cumpliendo con ciertos puntos que marcan las NOM y que se muestran a continuación:

- NOM-001-STPS-1999: El inciso 7.1 establece que el área cercana a una torre o estructura metálica de trabajo debe estar limpia de follaje.
- NOM-001-STPS-2000: El inciso 5.2 establece que la torre debe permanecer libre de signos de ruptura, corrosión, agrietamiento, pandeo, fatiga de materiales, deformación, hundimiento; y aunque la torre no presenta la mayoría de estos signos, si presenta corrosión en gran parte de su superficie. Los tensores deben estar libres de signos de fátiga y deformaciones.

- La normatividad de CFE dice que los tornillos deben estar apretados y libres de oxidación. La estructura metálica debe contar con señalamiento luminoso.
- NOM-004-STPS-1999: El inciso 7.2.2 señala que la torre debe contar con un destellador en la cúspide. Las luces de obstrucción deben estar en condiciones de uso.

4.2.2.2 Red hidráulica (Tuberías)

En el caso de la tubería es necesario realizar un rediseño, que implique una caída lineal, ubicando los caudalímetros a pie de máquina, esto para suavizar la entrada del flujo y eliminar pérdidas por codos y accesorios.

Mantener la misma tubería y el diseño lineal desde 10m hasta los 30m, pero al llegar a cuarto de máquinas, el diseño cambie a una caída línea, eliminando la tubería que se tiene a entrada por una menos alargada, como se muestra en la siguiente figura.

Esto provocaría que las pérdidas por fricción disminuyan drásticamente a como se muestra en el siguiente gráfico, todo manteniendo el mismo caudal. Este gráfico se construye con el modelo de pérdidas que ya se planteó en el capítulo 2, el cual ya se validó como modelo de evaluación

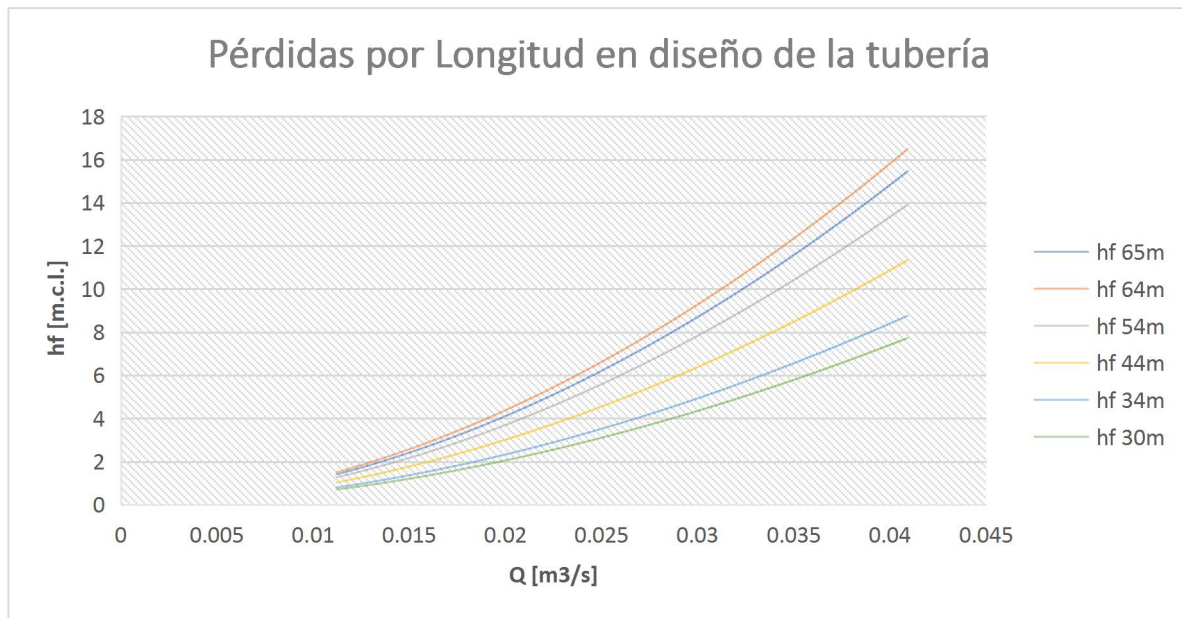


Gráfico 8 Variación de las pérdidas por longitud, mismo caudal a diferentes diseños de longitud de tubería.

4.2.2.3 Sistema de suministro

Para el sistema de suministro (sistema de bombeo fotovoltaico) es necesario de primera instancia aumentar la potencia del sistema, ya que el flujo de entrada para el sistema de turbinas, como se observa en las evaluaciones es de máximo un caudal de 16 l/s, para una mínima de 4 l/s, sin embargo, nuestro sistema necesita un sistema de flujo constante que permita ampliar las pruebas y que garantice un caudal que pueda ser variable a disposición del usuario.

4.2.2.4 Reservorios

En el caso de los reservorios, es necesario instalar un sistema de control que permita regular el caudal de salida y entrada, para poder variar la potencia hidráulica en función al caudal que se entregará a las turbinas, esto se propone con válvulas de cierre y apertura electromagnética de tipo mariposa. El esquema de función se muestra a continuación:

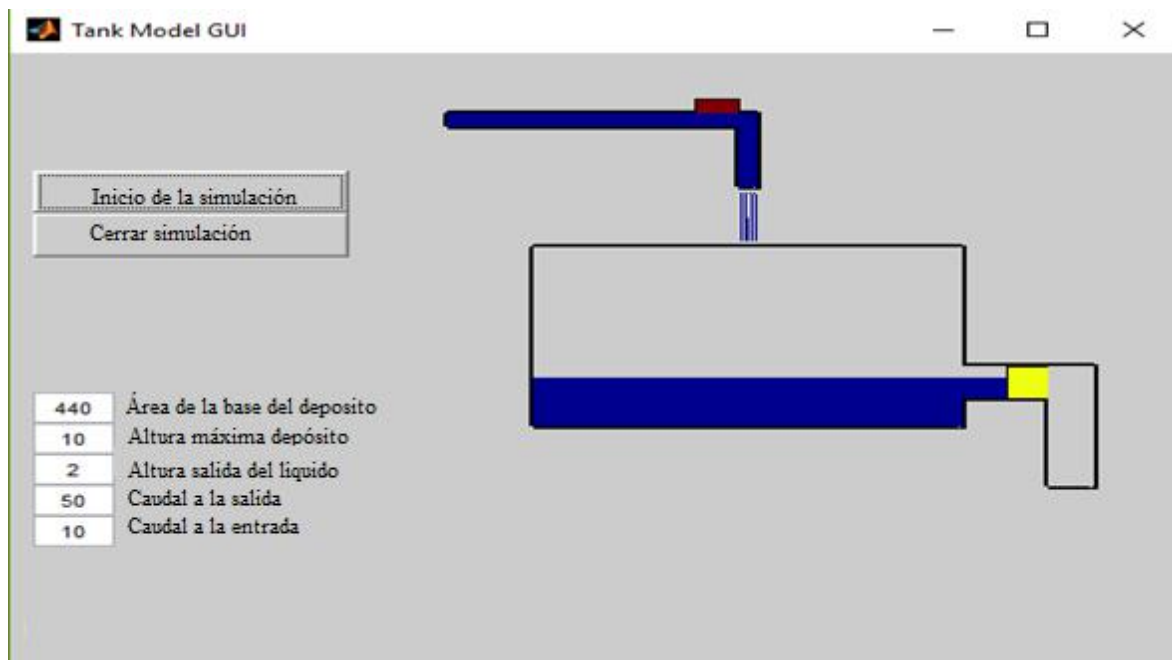


Ilustración 13 Propuesta de simulación para el sistema de apertura y cerrado de válvulas

?

Llenado y vaciado del tanque Automatización

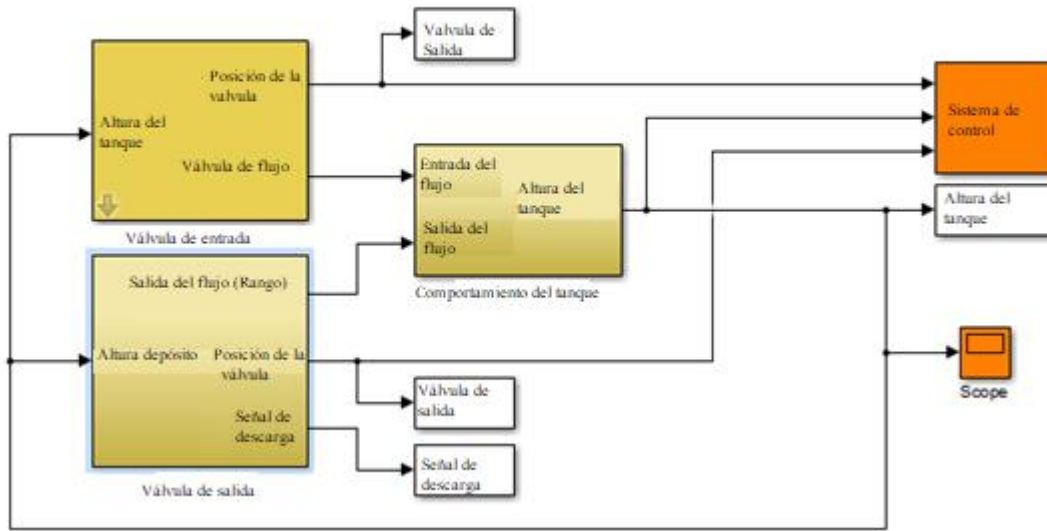


Ilustración 14 Esquema de funcionamiento para el sistema de simulación

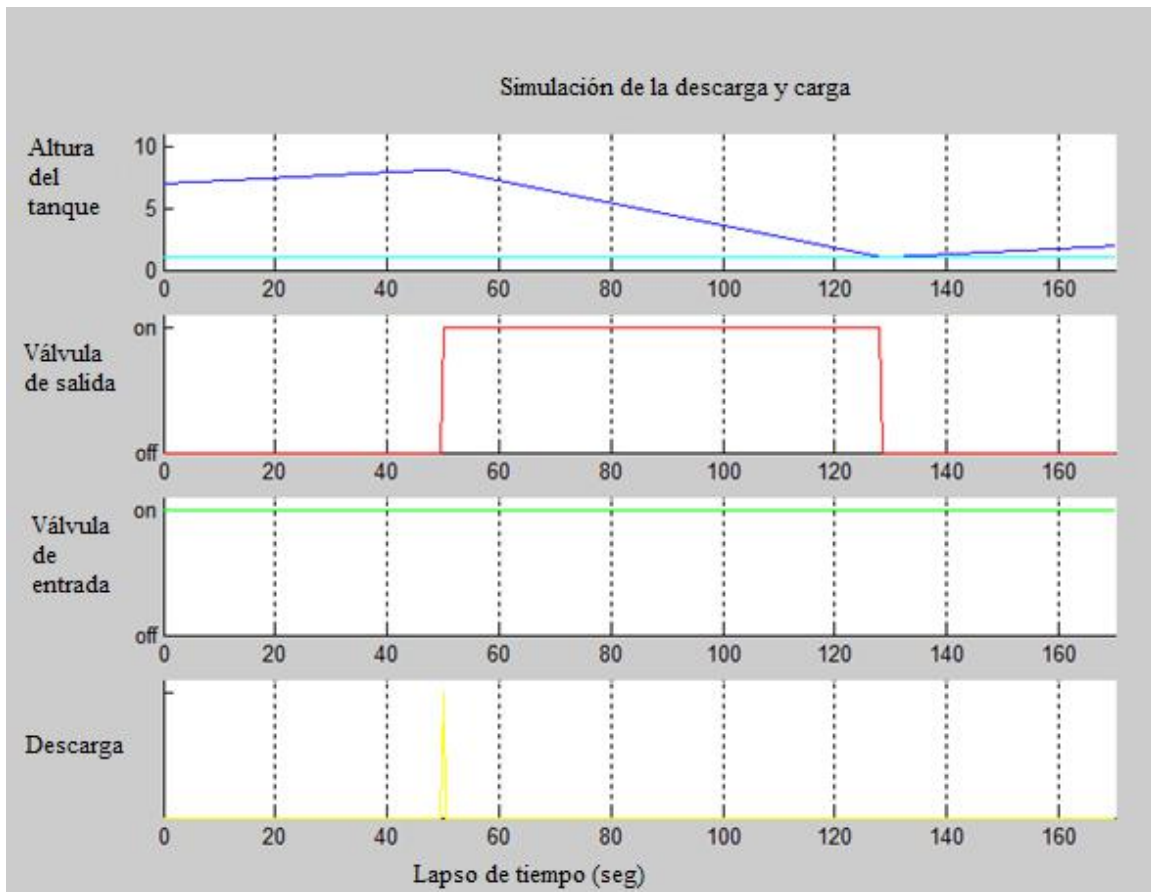


Gráfico 9 Resultados de la simulación propuesta para el rediseño

Como se observa en el gráfico, la variación del caudal es necesaria ya que como la descarga ocurre en tiempo mayor a la carga, dado el flujo de entrada respecto al de salida, se propone que la instalación de las válvulas es necesaria.

4.3 Simulación y análisis de los modelos aplicados al rediseño

En esta etapa de los resultados, se muestran ya los resultados de los modelos con las propuestas de diseño, para esto los datos de entrada son los mismos, pero con una propuesta de caudal regulado y un sistema de suministro a carga constante.

4.3.1 Simulación del modelo aplicado a la potencia de generación

En el caso de las turbinas, como bien ya se explicó, los datos que se evalúan primeramente son la potencia de la turbina, las revoluciones por minuto y la eficiencia.

De forma individual, la potencia del sistema con las condiciones de diseño que se encuentra, queda de la siguiente forma. Una potencia máxima aprovechable de 12kW, y por condiciones de diseño y eficiencia, la potencia mecánica se encuentra en un valor no mayor a los 10kW, y dada las condiciones del generador eléctrico que se tiene, por diseño, la generación no supera los 8kW, y eso se demuestra en el gráfico, en la serie de potencia eléctrica. Esto ya con las mejoras en el caudal propuestas y el diseño lineal adaptado a la red hidráulica.

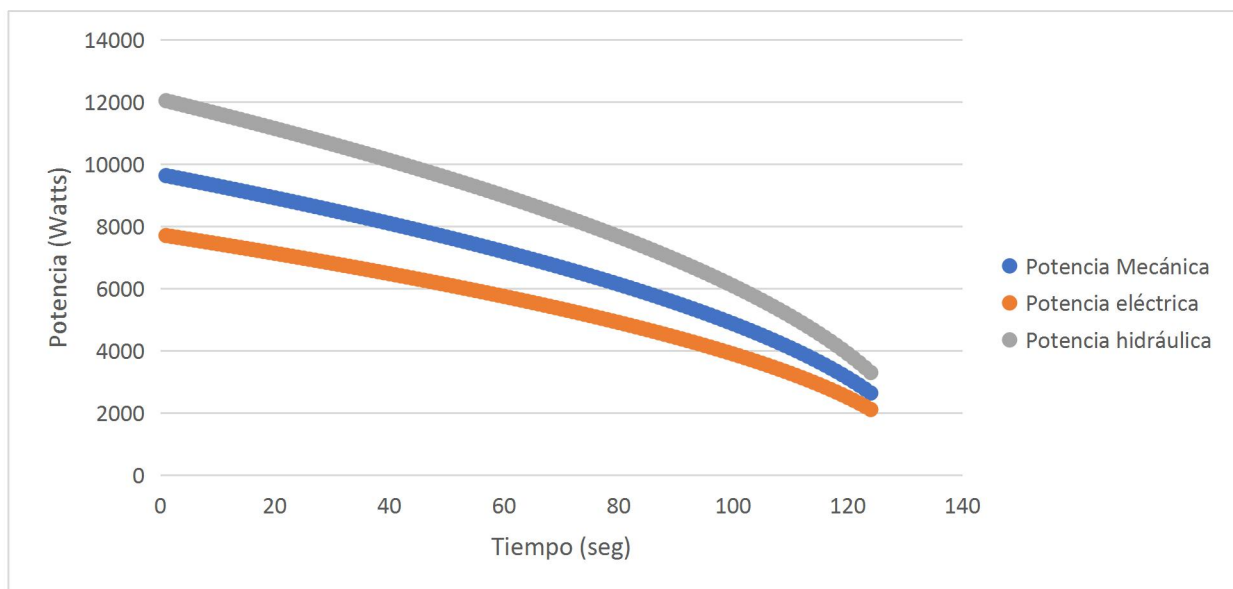


Gráfico 10 Modelo para cálculo de la potencia

Como se puede ver en la figura, existe una caída de la potencia respecto al tiempo, este fenómeno se presenta por el incremento en fricción que se da en la tubería. Con estos datos, se puede entonces proceder a calcular la variación de la potencia para la turbina directamente.

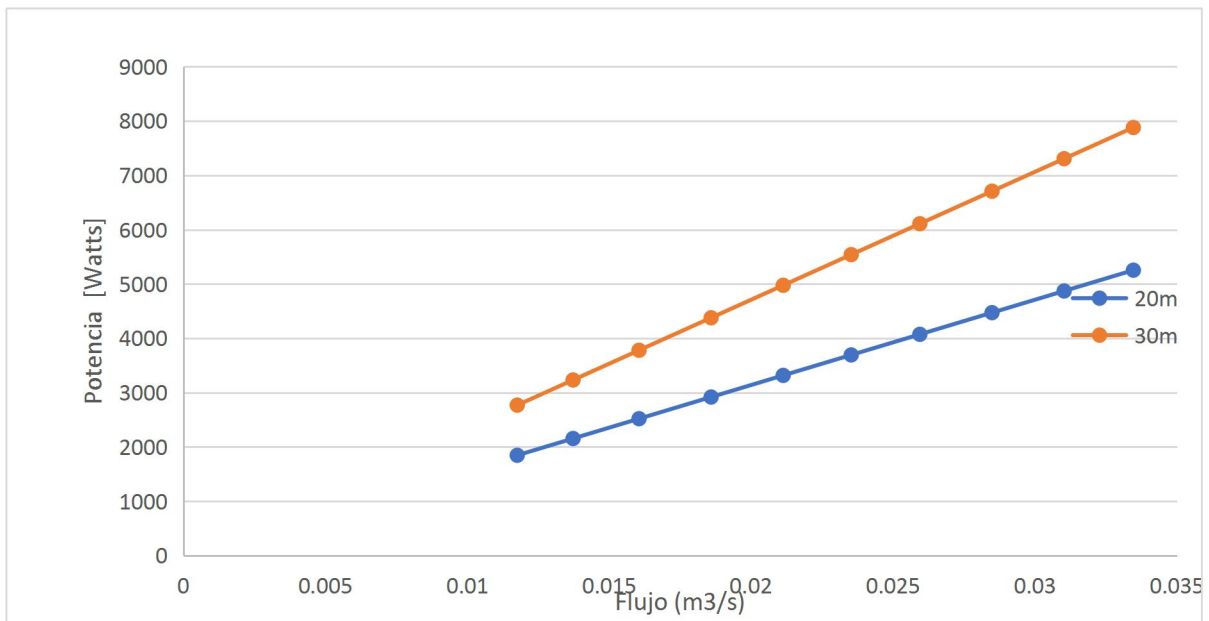


Gráfico 11 Análisis de la potencia mecánica de la turbina con respecto al caudal

Como se observa en la gráfica anterior, la potencia si alcanza los 8kw de generación estimada, si logramos mantener un flujo constante y aumentamos la velocidad.

4.3.2 Simulación del modelo aplicado a la velocidad de giro del sistema.

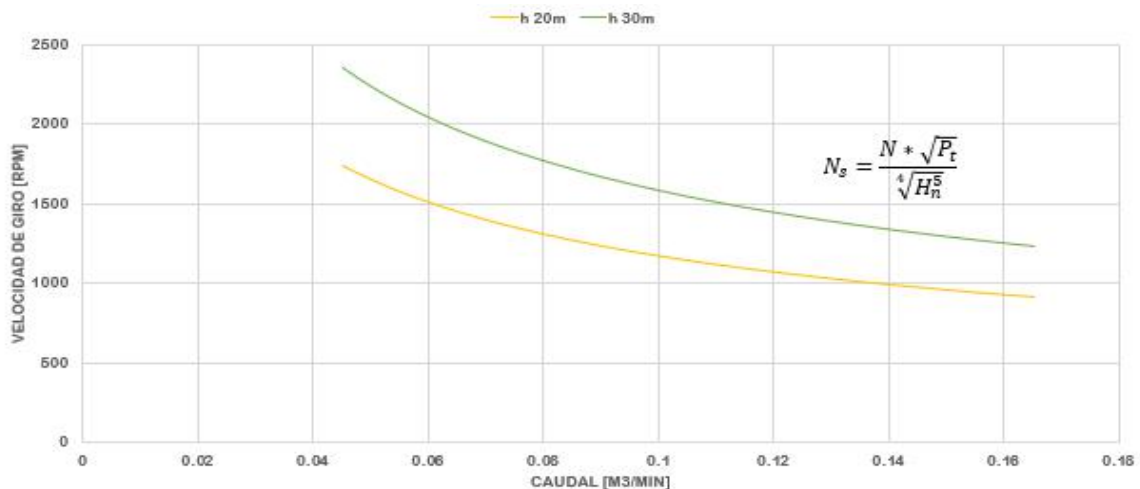


Gráfico 12 Análisis de la velocidad de giro de la turbina respecto al caudal

Como se observa en el gráfico de velocidad, las revoluciones caen respecto a la variación del caudal, pero ahora si respetando como tope máximo las revoluciones que coinciden con la velocidad nominal de la turbina que son las 2400 R.P.M.

Esto se obtiene controlando el caudal y logrando velocidades constantes, corrigiendo el diseño de la tubería por una con forma más lineal y, además, reduciendo las turbulencias a la entrada de las turbinas.

En la siguiente gráfica se puede apreciar que la eficiencia de la turbina mejora e incrementa con respecto al caudal, logrando mantener un incremento constante y permitiendo que el caudal se comporte de forma lineal.

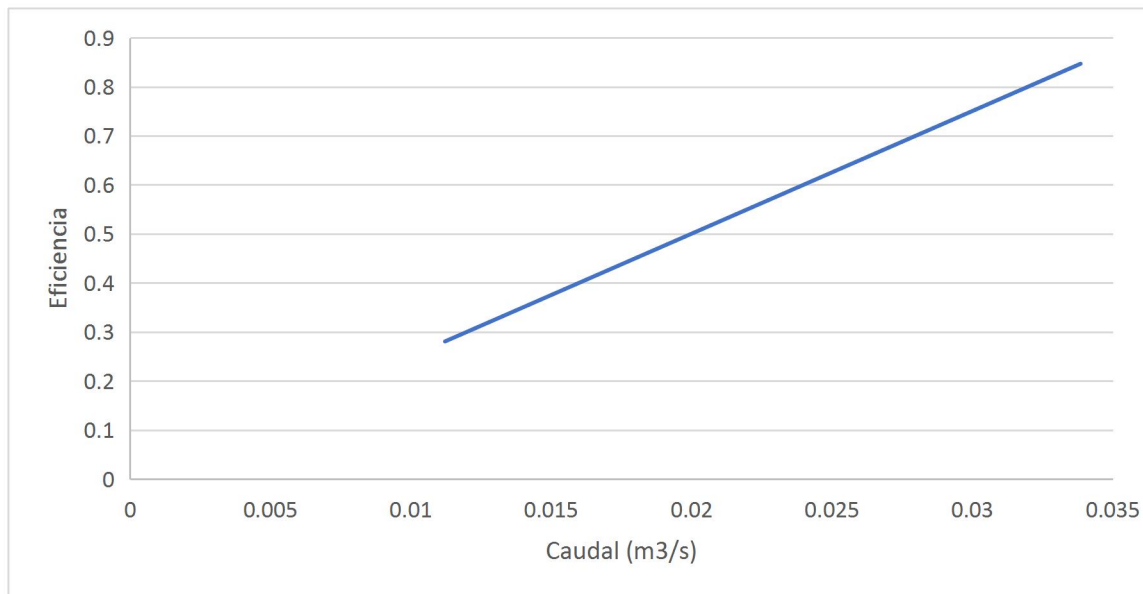


Gráfico 13 Análisis de la eficiencia respecto al caudal

4.3.3 Simulación de la turbina con la geometría actual

En los resultados obtenidos por la turbina, se presentan a continuación los gráficos resultado de la evaluación en el software Free FEM y al final de este apartado se muestran los valores en los que la turbina instalada debe funcionar para poder trabajar de forma correcta.

La turbina se modela como turbina T_{11} , por lo tanto, todos los parámetros de evaluación como potencia, caudal, eficiencia, llevarán como etiqueta de identificación el subíndice 11.

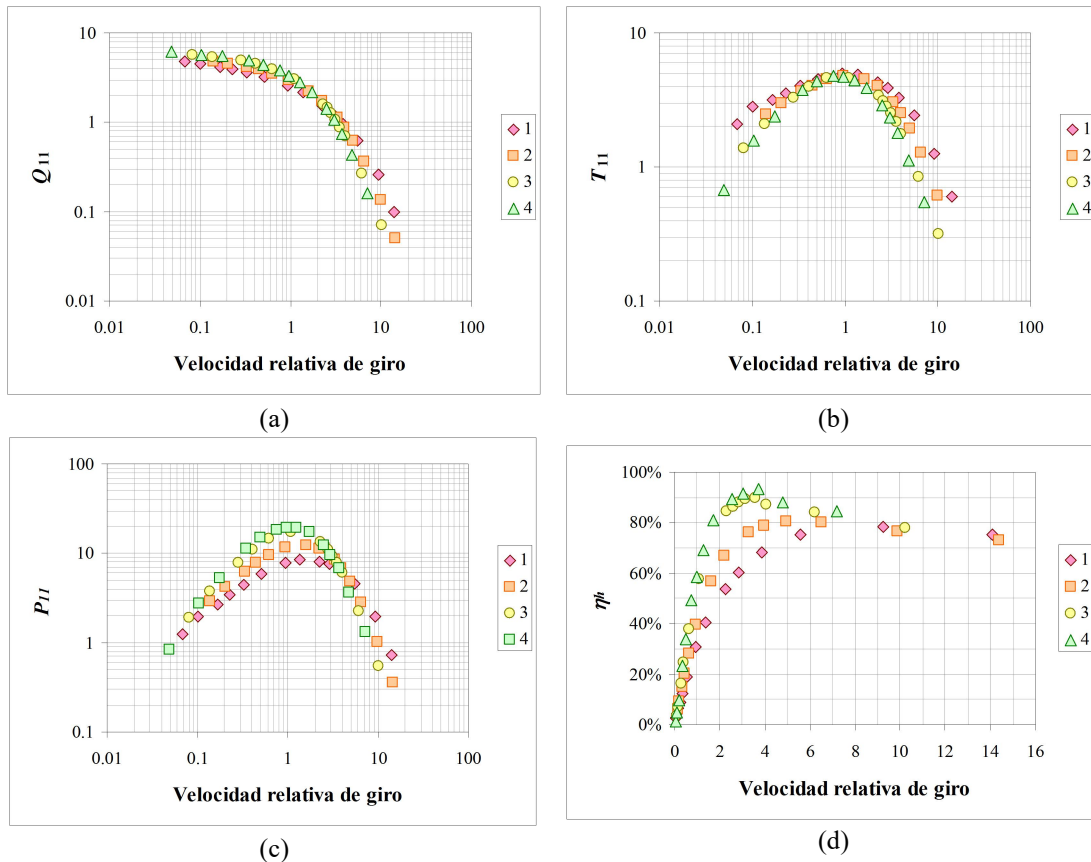


Fig. 1: Parámetros de operación de la turbina unidad en función de la velocidad relativa de giro, (a) Caudal, (b) Torque, (c) Potencia y (d) Eficiencia

Como se puede observar en los gráficos (a), (b), (c) y (d), el comportamiento de la turbina con un mallado distinto al del fluido en la evaluación (velocidad relativa de giro de 1700 RPM) se mantiene estable y de forma idónea, manteniendo la forma que debe en cada uno de los valores, evidenciando que puede trabajar en rangos distintos y conservar una operacionalidad correcta. Este primer análisis de la simulación se realiza con la velocidad de giro, considerando condiciones óptimas de funcionamiento.

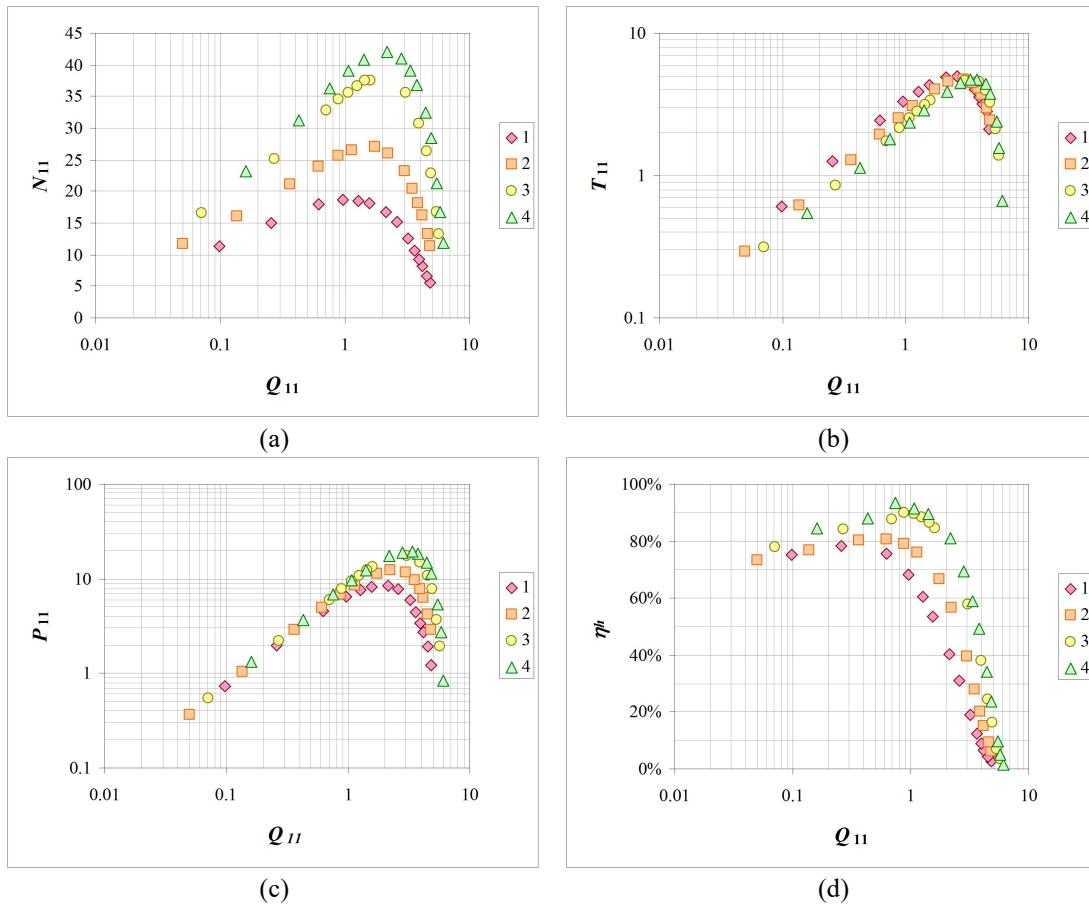


Fig. 2: Parámetros de operación de la turbina unidad en función de su caudal, (a) Revoluciones, (b) Torque, (c) Potencia y (d) Eficiencia

Es el caso del segundo análisis de simulación, todas las variables se simulan respecto al caudal, considerando el mismo resultado, las curvas se presentan en su forma idónea, manteniendo la constancia que deben a un caudal resultado, después de 10 iteraciones, lo cual se puede observar en los gráficos.

4.4 Conclusiones generales

Se evaluó, rediseñó y simuló el banco de pruebas hidráulico del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, lográndose una propuesta de diseño que garantiza la funcionalidad y la capacidad de realizar pruebas de bombeo fotovoltaico con altura variable, pruebas de carga dinámica en sistemas de tuberías hidráulicas y evaluación de turbinas hidráulicas de baja potencia (menores a 1kW).

4.4.1 En las evaluaciones, se demostró que el banco de pruebas sufre limitantes respecto al sistema de suministro de agua, ya que la bomba es de baja potencia respecto a la demanda que necesitan los reservorios y las turbinas hidráulicas, además que la carga es realizada en

un promedio de tiempo de 4 horas, respecto a la descarga que se realiza en aproximadamente 5 minutos, provocando debido al diseño, un decaimiento en la velocidad del flujo (variación de caudal), que influye directamente en la potencia y presión en el sistema, así mismo, esta variación influye en forma de pérdidas dadas según el modelo de Darcy en accesorios de diseño en la red hidráulica.

Los caudales obtenidos para la carga del sistema de los reservorios oscilan entre los 4 a los 16 litros sobre segundo, que permite un bajo funcionamiento del sistema, lo cual conlleva a una caída de presión en el sistema por la variación existente, que afecta directamente los resultados de la evaluación.

Para garantizar un correcto suministro de energía es necesario suministrar un caudal constante para poder realizar las pruebas de forma correcta, ya que un banco de prueba funciona con fluido que es suministrado de forma constante a lo largo del ciclo de uso.

Para garantizar un diseño correcto en la tubería de diseño es necesario realizar una reconfiguración de la tubería a lo largo del banco de pruebas, linealizar la caída y mantener de forma vertical a lo largo del tramo, para con esto disminuir las pérdidas dadas por accesorios.

Para garantizar un diseño correcto en las turbinas es necesario reajustar los datos de entrada respecto a los rangos de trabajo de la turbina instalada, ya que la turbina tipo “Michell Banki” trabaja mejor con mayor altura, las variaciones de caudal provocan una caída en su generación debido al sistema de transmisión que utiliza.

4.4.2 Con el rediseño del banco de pruebas se logró resolver los siguientes problemas:

- Se cambió un sistema de bombeo fotovoltaico de caudal regulable.
- Se reguló la salida del caudal en los reservorios para garantizar un mayor tiempo de prueba, en un intervalo de caudal de los 4 a los 16 l/s.
- Se realizó la modelación del comportamiento de los sistemas integrados en el banco de prueba, lograndose el dimensionado de las tuberías adecuadas de ingreso a la turbina para estabilizar la potencia y la velocidad de giro.
- Se predijo el comportamiento del caudal, siendo este el correspondiente al requerido para las pruebas según las normas oficiales mexicanas.

Sin embargo, fue necesario considerar la necesidad de:

- Disponer de un sistema de control para el cuarto de máquinas (turbinas hidráulicas, generador eléctrico y sistemas de medición), que además de sus funciones de regulación permita coleccionar datos de forma autónoma y que se registren en una base de datos.
- Linealizar la red hidráulica, que permita reducir el impacto por turbulencia en la tubería, provocando con esto una caída de presión y potencia en la turbina.
- Disponer de un sistema de bombeo que asegure un caudal mínimo de entrada de 16 l/s, de forma constante sin comprometer el sistema, para llevar a cabo las mediciones en un tiempo más prolongado. Permitiendo evaluar así con base a NOM-004-ENER-2014
- Reforzar las bases de los reservorios para garantizar la integridad de la instalación y de los usuarios de esta.

4.4.3 Como resultado de las simulaciones se determinó que los parámetros de funcionamiento del banco de pruebas son los siguientes:

- Caudal: $Q = 16 \text{ l/s} - 4 \text{ l/s}$
- Altura: $H = 30 \text{ m}$
- Eficiencia hidráulica: $\eta_h = 20\%$
- Potencia: $P = 1 \text{ kW}$

Además, se determinó que los parámetros para poder evaluar la turbina disponible (Michell Banki) es necesario disponer de los siguientes:

- Caudal: $Q = 36 \text{ l/s}$
- Altura: $H = 50 \text{ m}$
- Eficiencia hidráulica: $\eta_h = 51.04\%$
- Potencia: $P = 8 \text{ kW}$
- Revoluciones del rotor $N = 743.71 \text{ rpm}$
- Torque: $T = 0.3858 \text{ kN-m}$

Como se observa, la turbina disponible requiere de caudal, altura y potencia muy superiores a la disponible por el banco de prueba. Esto implica que el banco de pruebas es insuficiente para evaluar las turbinas disponibles. Se determinó que el banco de pruebas puede evaluar turbinas menores a 1kW.

Referencias

1. González Velasco, J. (2009). *Energías Renovables*. Barcelona, España: Reverté.
2. Capellán-Pérez, I., Mediavilla, M., de Castro, C., Carpintero, Ó., & Miguel, L. J. (septiembre de 2014). Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socio-económicos: un enfoque integrado. España.
3. Roldán Vilorio, J. (2013). *Energías Renovables. Lo que hay que saber*. España: Paraninfo.
4. Energía, S. d. (2014). *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables*. México.
5. Secretaría de Energía, S. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012- 2026*. México.
6. LAERFTE. (2013). *Ley para el aprovechamiento de Energías Renovables y el financiamiento de la transición energética*. México.
7. Secretaría de Energía, S. (2014). *Inventario Nacional de Energías Renovables*. México.
8. ITDG. (2009). *Organización Soluciones Prácticas ITDG*. Obtenido de www.solucionespracticas.org.pe: [ww.solucionespracticas.org.pe/fichastecnicas/pdf/fichatecnica25-turbinas%20pelton.pdf](http://www.solucionespracticas.org.pe/fichastecnicas/pdf/fichatecnica25-turbinas%20pelton.pdf)
9. Abdullah Nasir, B. (2014). Design Considerations of a Micro-Hydro-Electric Power Plant. *Energy Procedia*, 19-29.
10. Giosio, D. R., & Henderson, A. D. (2014). Design and Performance Evaluation of a Pump-as-Turbine-Micro-Hydro Test Facility With Incorporated Inlet Flow Control. *Renewable Energy*, 1-6.
11. Gutiérrez González, E., & Vladimirovna Panteleeva, O. (2016). *Estadística Inferencial para Ciencias e Ingenierías Vol I*. México: Patria.
12. ESHA, E. S. (2010). *Energy Recovery in Existing Infrastructures with Small Hydropower Plants*. Switzerland: Mhylab.
13. Penche, C. (1988). *Layman's Guidebook "How to develop a small hydro site"*. Bélgica: European Small Hydropower Association.
14. Singh, D. (2009). *Micro Hydro Power, Resource Assesment Handbook, An Initiative of the Asian Pacific Center for Transfer of Technology*.
15. Egúsqüiza Goñi, Julio César. (2009). Diseño de un Banco de Pruebas para Turbinas Michell Banki para el Laboratorio de Energía de la Pontifica Universidad Católica del Perú. Perú.
16. Costa Pereira, N. H.; Texeira Borges, J. E. B.; “Análise Computacional Bidimensional de Tubeiras Cross – Flow”. Technical University of Lisboa, Lisboa, 1994.
17. Pancorbo, A. F. (1961). Diseño de una Turbina Michel Banki. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
18. Bazo, C. A. (1980). Diseño, Construcción y Ensayo de Turbinas de Flujo Transversal para Microcentrales Eléctricas.

19. Instituto Nacional de Energía, I. (1986). Estandarización de Turbinas Tipo Michell Banki. Quito.
20. Vera, R. B. (2006). Estudio del Efecto del Espesor del Álabes y la Contracción de la Vena en el Diseño de Turbinas Hidráulicas de Flujo Cruzado. Lima.
21. Administration, U. E. (Enero de 2018). Energy Kids. Obtenido de www.eia.doe.gov/kids/energyfacts/sources/renewable.html
22. Augusto Hareau, A. L. (1960). Usina Hidroeléctrica en Rincón de Baygorria Rio Negro. Uruguay.
23. Díez, P. F. (2000). Turbinas Hidráulicas. Universidad de Cantabria.
24. ESHA, E. S. (2010). Energy Recovery in Existing Infrastructures with Small Hydropower Plants. Switzerland: Mhylab.
25. Giosio, D. R., & Henderson, A. D. (2014). Design and Performance Evaluation of a Pump-as-Turbine-Micro-Hydro Test Facility With Incorporated Inlet Flow Control. *Renewable Energy* , 1-6.
26. González, L. (1960). Turbinas Hidráulicas. Ciudad Universitaria.
27. Gutiérrez González, E., & Vladimirovna Panteleeva, O. (2016). Estadística Inferencial para Ciencias e Ingenierías Vol 1. México: Patria.
28. Instituto Nacional de Energía, I. (1986). Estandarización de Turbinas Tipo Michell Banki. Quito.
29. Instituto Tecnológico de Canarias, ITC. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Canarias.
30. Ren21. (2018). Renewables 2018 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.
31. Secretaría de Energía, S. (2016). Prospectiva de Energías Renovables, 2016-2030. México.
32. SENER. (2017). Reporte de Avance de Energías Limpias, Primer Semestre 2017. México.
33. Singh, D. (2009). Micro Hydro Power, Resource Assesment Handbook, An Initiative of the Asian Pacific Center for Transfer of Technology .
34. Treballe, D. (2006). La Generación Distribuida en España. Madrid, España.: Universidad Pontificia de Comillas.
35. Velilla, J. P. (2015). Sistemas de Energías Renovables. Madrid: Paraninfo.
36. Viedma Robles, A., & Zamora Parra, B. (1977). Teoría de Máquinas Hidráulicas. Madrid: Servicio de Publicaciones Murcia.
37. Coz Pancorbo, A. F., “Diseño de una Turbina Michell – Banki”. Tesis de Competencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1961.
38. Hernández Bazo, C. A.; “Diseño, Construcción y Ensayo de Turbinas de Flujo Transversal para Microcentrales Eléctricas”. Tesis de Competencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1980.
39. INE – Instituto Nacional de Energía, “Estandarización de Turbinas tipo Michell Banki”, Quito, 1986.
40. Cotacallapa Vera, R. B.; “Estudio del Efecto del Espesor de Álabes y la Contracción de la Vena en el Diseño de Turbinas Hidráulicas de Flujo Cruzado”. Tesis de Competencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2006.

41. Bernardi, D.; Hecht, F.; Ohtsuka, K.; Pironneau, O.; “FreeFEM+ for Macs, PCs, Linux”, 1998.
42. Costa Pereira, N. H.; Texeira Borges, J. E. B.; “Análise Computacional Bidimensional de Tuberias Cross – Flow”. Technical University of Lisboa, Lisboa, 1994.
43. Costa Pereira, N. H.; Texeira Borges, J. E. B.; “Study of the Nozzle Flow in a Cross – Flow Turbine”. Technical University of Lisboa, Lisboa, 1995.
44. Ishimatsu, K.; Kage, K.; Okubayashi, T.; “Simulación for the Flow around Cross Flow Turbine with end plates”. JSCFP, Tokio, 2000.