



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO DE UNA TURBINA DE TORNILLO HIDRODINÁMICO PARA MICROGENERACIÓN EN
ZONAS AISLADAS**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTADO POR:

21151056 FRANCISCO ANTONIO BOGRÁN MARADIAGA

ASESOR: ALICIA MARÍA REYES DUKE

CAMPUS SAN PEDRO SULA, CORTÉS; ABRIL, 2021

DERECHOS DE AUTOR

© Copyright 2021

Francisco Antonio Bográn Maradiaga

Todos los derechos son reservados.

RESUMEN EJECUTIVO

El desarrollo económico en Honduras es paradójico porque en el país hay una abundancia de escasas a pesar de tener abundancia de riqueza en recursos naturales. Un factor influyente en esto es nuestra inhabilidad por escasas de conocimiento de cómo aprovechar al máximo nuestros recursos naturales mediante el uso de tecnología disponible abiertamente en el mundo. Las turbinas de tonillo son un ejemplo de dicha tecnología. El tonillo de Arquímedes es un invento milenario, las turbinas de tonillo fueron diseñadas por primera vez hace más de un siglo, pero en las últimas décadas las turbinas de tornillo se han modernizado y se han aplicado exitosamente proyectos de diversos tamaños en países desarrollados como los Estados Unidos de América, Japón, Inglaterra y Holanda. Lo que se propone en el presente documento es la realización de un diseño de una turbina de tornillo para la microgeneración hidroeléctrica en zonas aisladas. Se presentan los factores que influyen en el diseño del tornillo y los factores que influyen en la capacidad de generación eléctrica.

Palabras Claves: Energía hidroeléctrica, micro-generación, desarrollo social, tornillo de Arquímedes, turbina de tornillo, energía renovable, zonas aisladas, electrificación rural.

ABSTRACT

The economic development in Honduras is paradoxical since in the country there is an abundance of scarcity even though it has an abundance of richness in natural resources. An influential factor in this fact is that the Honduran people are unable to make proper use of their resources due to their lack of knowledge on how to maximize their usage with the openly available technology in the world. The screw turbines are an example of said technology. The Archimedes Screw is an ancient invention, the hydrodynamic screws where design for the first time over a century ago, however in the last decades the screw turbines have been modernized and their usage has been applied successfully in projects of different sizes in What is proposed hereinto is the design of in many developed countries like USA, Japan, England and The Netherlands. What is proposed hereinto is the design of a screw turbine for hydroelectric microgeneration in rural areas. Presented here are the factors that influence in the design of the screw and the factors that influence in the electrical generation capacity.

Key Words: *Hydroelectric Energy, Microgeneration, Social Development, Archimedes Screw, Renewable Energy, Rural Electrification.*

DEDICATORIA

*A mi modelo a seguir y quien siempre me motivó a seguir adelante sin importar del desafío,
mi hermano mayor:*

Fausto Daniel Bográn Maradiaga

*A quien siempre estuvo junto a mí, más que dispuesto para apoyarme incondicionalmente a
través de los años, siempre motivándome a nunca rendirme, y me enseñó el valor de la lectura, mi
padre:*

Fausto Daniel Bográn Cárcamo

*A quien me inspiró a hacer un proyecto de electrificación rural para fomentar el desarrollo
social en mi país:*

Aliaume Damala Badara Akon Thiam

*A los ingenieros profesores que me tuvieron paciencia, me motivaron y enseñaron el
verdadero valor de hacer proyectos que me retén:*

Ing. José Luis Ordoñez e Ing. Orlando Aguiluz Guevara

AGRADECIMIENTO

A mis asesores del proyecto de investigación, de metodología y temático, quienes me regalaban de su tiempo para poder guiarme en el proceso correcto para convertir mi idea del proyecto en algo concreto.

A mis amigos, compañeros de universidad cuyos éxitos y trabajos me sirvieron como desafío y como motivación a querer completar con mis obligaciones universitarias.

A mis familiares quienes siempre estuvieron a la par mía y siempre me alentaron a continuar y completar esta fase de mi vida.

NOTACIÓN

Lo siguiente es un listado de los símbolos utilizados en el reporte:

G = hueco o espacio entre el tornillo y el canalizador (m);

g = aceleración gravitacional 9.81 m/s^2 ;

H = diferencia en altura (m);

h_{in} = altura del agua en la entrada del tornillo (m);

h_{out} = altura del agua al salir del tornillo (m);

N = Número de álabes en el tonillo;

n = velocidad rotacional (m^{-1});

P_{br} = pérdida de potencia por rodamiento (kW);

P_{hydr} = pérdida de potencia hidráulica (kW);

P_L = fuga de potencia (kW);

P_M = potencia mecánica (kW);

P_{th} = potencia teórica (kW);

Q = caudal total del agua (L/s);

Q_G = caudal de fuga en hueco (L/s);

Q_L = fuga total de caudal (L/s);

Q_O = caudal de fuga por desbordamiento (L/s);

R_o = radio exterior del tornillo (m);

R_i = radio interior del tornillo (m);

S = periodo del tornillo (m); Paso de Tornillo; distancia entre una cresta de la rosca del tornillo hasta la siguiente cresta;

$T = \text{torque del tornillo (N}\times\text{m)}$;

$V_B = \text{volumen de ducto por giro (L)}$;

$V_U = \text{volumen por turno (L)}$;

$\beta = \text{inclinación del tornillo (rad)}$;

$\eta = \text{eficiencia de potencia}$;

$\rho = \text{densidad del agua (kg/m}^3\text{)}$;

$\varphi = \text{factor de llenado}$.

LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

FHIA = Fundación Hondureña de Investigación Agrícola

GEI = Gases Efecto Invernadero

MCHTTH = Micro-Centrales Hidroeléctricas de Turbina de Tornillo Hidrodinámico

MGH = Micro-Generación Hidroeléctrica

CMGH = Centrales de Micro-Generación Hidroeléctrica

TTH = Turbina de Tornillo Hidrodinámico

Paso de Tornillo = distancia entre una cresta de la rosca del tornillo hasta la siguiente cresta.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
II.	Planeamiento Del Problema.....	3
2.1.	Precedentes Del Problema.....	3
2.1.1.	Zonas Aisladas	3
2.1.2.	Historia del Tornillo de Arquímedes.....	4
2.1.3.	Dependencia en Combustibles Fósiles	4
2.1.4.	Generación Hidroeléctrica.....	5
2.1.5. ¡Error! Marcador no definido.	
2.2.	Definición del Problema	9
2.2.1.	Microgeneración Hidroeléctrica.....	9
2.2.2.	Turbinas de Tornillo.....	8
2.3.	Justificación.....	10
2.3.1.	Justificación	10
2.3.2.	Microgeneración en Honduras.....	11
2.3.3.	Motivación.....	12
2.3.4.	Porque es Necesario.....	13
2.4.	Preguntas de la Investigación	14
2.4.1.	Sistema Mecánico.....	14
2.4.2.	Sistema Eléctrico	14
2.4.3.	Sistema de Control.....	15
2.5.	Objetivos del Proyecto	15

2.5.1.	Objetivo General	15
2.5.2.	Objetivos Específicos.....	15
III.	Marco Teórico.....	17
3.1.	Análisis de la Situación Actual.....	17
3.1.1.	Historia del Tornillo de Arquímedes	17
3.1.2.	Macro Entorno	18
3.1.3.	Micro Entorno	19
3.1.4.	Entorno Interno	19
3.2.	Teoría de Sustento.....	19
3.2.2.	Clasificación de Generación Hidroeléctrica.....	20
3.2.2.	Clasificación de Turbinas Hidráulicas para Centrales Hidroeléctricas.....	7
3.3.	Marco Legal.....	23
3.3.1.	Decreto No. 404-2013.....	23
3.3.2.	Fondo Social de Desarrollo Eléctrico (FOSODE).....	23
3.3.3.	Oficina de Electrificación Social (OES).....	23
3.3.4.	Protocolo IEC 61850	¡Error! Marcador no definido.
3.4.	Sistema de Control	¡Error! Marcador no definido.
3.4.1.	Requerimientos de un Sistema de Control en una Planta Eléctrica	42
3.4.2.	Componentes Esenciales de Control.....	43
IV.	Metodología.....	25
4.1.	Enfoque	25
4.2.	Técnicas de Investigación.....	26
4.2.1.	Simulaciones.....	26

4.2.2.	Matriz de Decisión o Multicriterio.....	27
4.3.	Metodología de Estudio	27
4.3.1.	Nivel de Sistema.....	28
4.3.2.	Nivel de Módulos.....	28
4.3.3.	Nivel de Componentes	28
4.4.	Cronograma de Actividades.....	29
V.	Resultados y Análisis	36
VI.	Conclusiones	46
VII.	Recomendaciones	¡Error! Marcador no definido.
VIII.	Bibliografía.....	48
	Listado Bibliográfico.....	48

I. INTRODUCCIÓN

Es imposible que en cualquier país su respectivo sistema eléctrico nacional pueda cubrir el cien por ciento de su territorio nacional. Barreras geográficas, como bosques y cordilleras, encarecen el mero intento de trazar la conexión a través de ellas. Por lo cual es común que se formen áreas que no están interconectadas a la red eléctrica nacional, estas conocidas como "zonas aisladas". Invariable de que parte del mundo están, las poblaciones que viven dentro de zonas aisladas tienen a tener las mismas características: alta dependencia a hidrocarburos, bajo nivel de electrificación, y desarrollo económico atrasado.

En el mundo económico moderno la energía eléctrica es uno de los componentes fundamentales para todo tipo de actividad comercial. Aun si la actividad se puede realizar sin electricidad, la energía eléctrica permite que una persona pueda completar dichas actividades en menor tiempo. Entre mayor es el consumo eléctrico per cápita en una zona o población, mayor será su desarrollo económico (Yu & Hwang, 1984). Esto fue adicionalmente comprobado por el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (*United Nations Development Programme, UNPD*) tras completar un proyecto desarrollo en regiones remotas de Afganistán (*Thousands in Rural Afghanistan Hook up to Hydropower, 2011*), en el cual instalaron 34 turbinas hidroeléctricas de 25kW a 50 kW en las áreas mencionadas. Con la electrificación hidroeléctrica las comunidades que viven en las áreas mencionadas ahora ya no dependen en combustibles inflamables y tóxicos para iluminar sus casas. Adicionalmente, ahora poder utilizar máquinas eléctricas para realizar los trabajos que anteriormente hacían a mano.

A pesar de ser un país árido y desértico, los proyectos de micro-centrales hidroeléctricas en Afganistán han sido y siguen siendo exitosos. Pero Honduras no es un país con un desierto seco, Honduras es un país con un recurso hídrico abundante que cuenta con 19 cuencas hidrográficas mayores (*Global Water Partnership: Honduras, 2016*). Para solucionar el problema del alto costo eléctrico y la dependencia a los hidrocarburos en las zonas aisladas, es necesario implementar proyectos de generación eléctrica que aprovechen los recursos renovables ya disponibles en la

región. Estos pueden ser proyectos de energía solar, eólica, biomasa, geotérmica, e hidroeléctrica (Con Sistemas Híbridos Se Iluminan Zonas Aisladas - ProQuest, 2013)

De las fuentes energías renovables la energía hidroeléctrica es la más eficiente y constante ya que es capaz de operar día y noche siempre y cuando el caudal del río sea suficiente para hacer girar la turbina. Las micro-centrales hidroeléctricas de turbina de tornillo hidrodinámico (MCHTTH por sus iniciales) no requieren embalses y mantenimientos extensos, y pueden operar con caídas de agua mínimas. Por lo cual tienen un bajo costo de inversión, haciéndolas atractivas para proyectos de desarrollo. Tomando esto en mente, lo que la presente investigación busca demostrar es como diseñar una micro-central hidroeléctrico de turbina de tornillo para poder electrificar las zonas aisladas.

II. PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se describirá a fondo la historia de cómo se generó el problema de investigación, y él porque es tan importante resolverlo.

2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA

En la siguiente sección del informe se explicarán los antecedentes de la investigación, incluyendo las zonas aisladas y como se generan, la línea de tiempo de la turbina de tornillo, y proyectos de microgeneración en Honduras.

2.1.1. ZONAS AISLADAS

Ningún país en el mundo es capaz de crear y operar una red de suministro eléctrico que pueda cubrir la totalidad de su territorio nacional. No es porque es imposible hacerlo, se puede construir tal red, pero el costo de construcción y costo de mantenimiento sería tan alto que rendirían tal proyecto extremadamente impráctico y no rentable. Debido a esto es normal que se surjan zonas que no están interconectadas al sistema eléctrico nacional, a estas zonas se les denominan "Zonas Aisladas".

En general hay tres factores que influyen en la formación de zonas aisladas: factor geográfico, factor densidad poblacional y factor político (Samuel J. Williamso et al., 2019). El factor geográfico es cuando hay una barrera geográfica que impide que la red nacional pueda conectarse a la población que está al otro lado de la barrera. Generalmente son cordilleras de montañas, bosques extensos, desiertos o incluso un mar. Ir a través o alrededor de la barrera haría el proyecto demasiado costoso para ser factible. El factor densidad poblacional se debe a porque cuando se realizan proyectos de interconexión siempre se priorizan los centros de población más grandes. Esto es porque entre mayor es el nivel de población mayor es el consumo eléctrico y por ende más rápido sería el retorno de inversión. Lugares que tienen baja densidad poblacional no consumen suficiente electricidad para ser justificar tal inversión. El tercer factor es el factor político. Este factor va de la mano con los factores anteriores ya que para todo proyecto infraestructura mayor para la red eléctrica debe ser aprobado por el gobierno entonces se debe justificar ante el

congreso. Si el proyecto no beneficiará a un sector mayor de la población o tendrá un lento retorno de inversión, entonces no tendrá beneficio político para quienes determinan la aprobación del proyecto.

2.1.2. HISTORIA DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES

El tornillo de Arquímedes, o tornillo sin fin, es un tipo de tornillo helicoidal inventado en el siglo III a.C. por el genio matemático Arquímedes de Syracuse. El mismo Arquímedes que descubrió el principio de Arquímedes para encontrar la densidad de un objeto, derivó una aproximación precisa del número pi, y creó máquinas de guerra para defender su ciudad natal contra el ejército romano. Las máquinas bélicas de Arquímedes fueron efectivas para hundir y quemar una gran porción de la flota romana, ganándose el respeto y admiración del alto mando romano, pero al final Syracuse cayó ante el poder romano.

La función del tornillo era servir como un mecanismo que permitiría al humano poder llevar agua a zonas elevadas para poder asistir con la irrigación de campos. Arquímedes construyó su tornillo por primera vez mientras estudiaba en Alejandría, Egipto. Hay historiadores que especulan que los jardines Colgantes de Babilonia eran irrigados mediante el bombeo de agua utilizando el tornillo. En historia más reciente, Los Países Bajos usaron los tornillos de Arquímedes para poder reclamar tierra inundado por el mar.

En cuanto a la generación hidroeléctrica, no fue hasta 1819 cuando el ingeniero francés Claude Louis Marie Henri Navier propuso por primera vez usar el tornillo de Arquímedes como una rueda de agua. En 1916 William Moersher aplicó por una patente en USA para una turbina de tornillo hidrodinámico.

2.1.3. DEPENDENCIA EN COMBUSTIBLES FÓSILES

Las poblaciones que viven dentro de las zonas aisladas dependen fuertemente en combustibles fósiles para poder generar electricidad y poder iluminar sus hogares. Esto representa un costo sofocante para las comunidades ya empobrecidas debido a que los generadores diésel tienen consigo un alto costo de operación ya que el combustible tiene que ser transportado largas

distancias. Sin mencionar que las operaciones de mantenimiento son costosas y constantes. Lo que provoca que las personas de estas comunidades tomen la decisión o de continuar su vida sin electricidad o migrar buscando mejor vida.

Adicional al impacto económico, el almacenamiento incorrecto de los combustibles tiene un alto riesgo de contaminación ambiental. Combustible derramado puede contaminar el agua potable de la comunidad, convirtiéndola imbebible. Sin mencionar que estos combustibles son dañinos para la salud de las personas.

De acuerdo a las experiencias reportadas de la FHIA (Domínguez Suazo, Milton Eduardo, 2012) Honduras es un país altamente dependiente del petróleo para la generación termoeléctricas, lo cual incurre en un alto costo de generación. Gran parte de la factura petrolera se debe a los costos de importación, transporte marítimo y terrestre. Al mismo tiempo, debido al uso masivo de las plantas termoeléctricas en el país genera casi 2.6 millones de toneladas de Gases Efecto Invernadero (GEI). Lo cual convierte a Honduras en el mayor productor de GEI de Centroamérica.

2.1.4. GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La generación eléctrica consiste en la transformación de una forma de energía en energía eléctrica. Las centrales generación eléctrica es clasificada con base a su fuente de energía, por ejemplo: la fuente primaria de las centrales hidroeléctricas es flujo del agua, la fuente primaria de una termoeléctrica es el vapor generado en una caldera, la de una solar fotovoltaica es la energía solar, y el de una central nuclear es de energía nuclear (*Serna - Eficiencia energética alternativa de transformaci.pdf*, 2019). La energía eléctrica es generada mediante la inducción electromagnética, que transforma la energía cinética en energía eléctrica por medio del generador. En la generación hidroeléctrica la capacidad de generación es directamente proporcional al caudal de agua y altura de caída.

Las turbinas hidráulicas son diseñadas para aprovechar los caudales de los ríos y altura de caídas, por lo cual entre mayor es el caudal y la altura mayor será la capacidad de generación. No obstante las turbinas deben ser capaces de trabajar dichos caudales y alturas, y por ende no hay un tipo de turbina que pueda trabajar eficientemente con cualquier tipo de caudal y caída de agua.

Hay turbinas que están diseñadas para trabajar en caudales bajos y alturas bajas, al igual que hay turbinas que están diseñadas para caudales altos y alta caída de agua.

2.1.5. MICROGENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La generación hidroeléctrica se puede clasificar dependiendo de sus niveles de generación. En la tabla 01 (FHIA, 2009) se muestra los seis niveles de clasificación de planta hidroeléctrica de acuerdo a su capacidad de generación. La generación de las plantas Pico, Micro y Mini se miden en kilowatts. Le energía producida en la pico-generación es suficiente para una casa pequeña o para iluminar las calles de una aldea. La micro-generación y la mini-generación si tienen la capacidad para iluminar una aldea entera. Las plantas hidroeléctricas de pequeña-generación tiene la capacidad suficiente para suministrar de electricidad a una empresa de gran tamaño. Mientras que las plantas hidroeléctricas de mediana y gran-generación ya son plantas con capacidad de electrificar ciudades enteras.

Tabla 01 Tipo Plantas Hidroeléctricas Por Capacidad De Generación

Plantas Hidroeléctricas	Capacidad de Generación
Pico	Menor de 5 kW
Micro	5 kW – 100 kW
Mini	Mayor de 100 kW pero Menor de 1 MW
Pequeña	1 MW – 15 MW
Mediana	15 MW – 100 MW
Grande	Mayor de 100 MW

La microgeneración hidroeléctrica tiene la capacidad de poder satisfacer en parte las necesidades eléctricas de estas comunidades. Este tipo de centrales aprovechan los recursos naturales ya disponibles en la geografía de la zona. Reduciendo la dependencia a los combustibles fósiles y consecuencia, se reduce el costo eléctrico de las comunidades. Liberando capital que podría utilizar para otros proyectos o iniciativas.

A pesar de la energía hidroeléctrica es considerada la energía renovable más eficiente y con el mejor rendimiento, tiene varios puntos que son criticables. Particularmente por ambientalistas. El punto más criticado de las hidroeléctricas es como los embalses cambian los ecosistemas de los ríos y daño generado, por tener que inundar el área para hacer el embalse. Sin mencionar el número de personas desplazadas por sus hogares estaban en el área inundada para hacer el embalse.

2.1.6. CLASIFICACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Las turbinas hidráulicas son máquinas rotativas que convierten la energía cinética del agua en trabajo mecánico. Como se demuestra de la Fig. 01, cuando las turbinas giran su movimiento hace girar el generador. Es el generador que convierte el trabajo mecánico en energía eléctrica. La Fig. 02 muestra la dirección en que entra el flujo de agua en las tres turbinas, al igual que la dirección que salen.

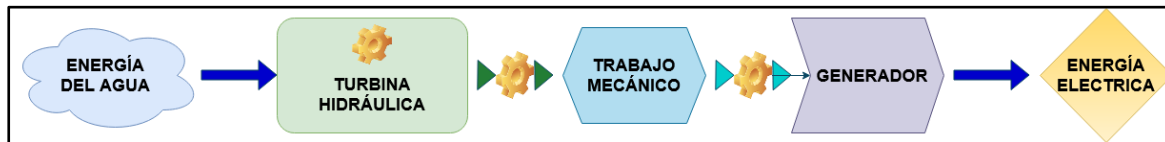


Figura 01. Proceso de Transformación de la energía.
(Diagrama de elaboración propia.)

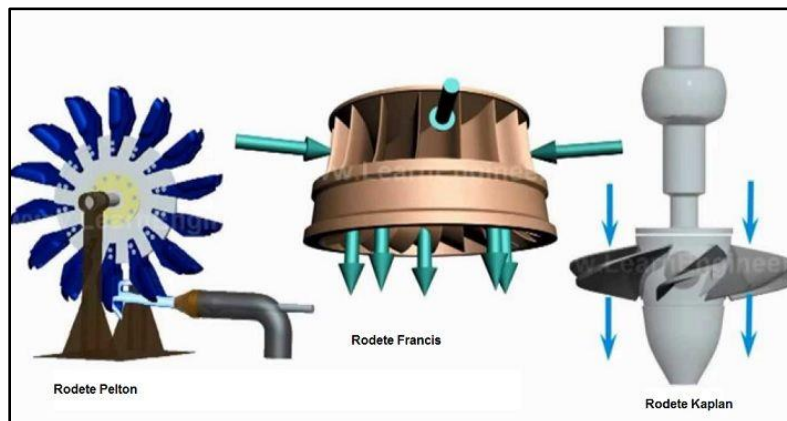


Figura 02. Diagrama de turbinas con flujo de agua. (Areatecnologia.com, 2015)

2.1.6.1. TURBINA FRANCIS

Las turbinas Francis son turbinas tipo reacción, turbinas cuyo giro del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua. Pueden operar con una variedad de flujo de agua y altura de entre 40-600 metros, pero debe mantenerse lleno de agua en todo momento. Su versatilidad en diferentes niveles de flujo y caída de agua le ha permitido ser la turbina más usada en el mundo.

2.1.6.2. TURBINA KAPLAN

Las turbinas Kaplan son turbinas de reacción de construcción similar a las turbinas Francis. Pero a diferencia de las turbinas Francis, las turbinas Kaplan son utilizadas para caudales rápidos y pequeña altura de caída de agua, hasta 50 m.

2.1.6.3. TURBINA PENTON

También conocidas como "Ruedas Pelton", son turbinas de acción, o tangencial, por la dirección en que el agua golpea a los álabes. Son utilizados para caudales pequeños menores de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y caídas de agua superiores a 200m.

2.1.7. TURBINAS DE TORNILLO

Para el presente proyecto se enfocará en la turbinas de tornillo, éstas tienen forma de tornillo de Arquímedes cuya forma las hace ideales para aplicaciones de bajo flujo de agua y caída de agua bajo (Ligon et al., 1995).

La turbina de tornillo hidrodinámicas (TTH) está diseñada para poder generar con caudales bajos de agua y sin la necesidad de un embalse para una caída de agua. A parte de una rejilla que bloqueé el paso de escombros, las TTH no requieren desarenadores ni grandes construcciones de concreto. Lo cual reduce el tiempo y costo de mantenimiento y también significa que requiere un menor costo de inversión.

2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la presente sección se definirá el problema de investigación y se describirá los factores que lo influyen. Al mismo tiempo, se describirá como se puede clasificar la generación hidroeléctrica.

2.2.1. ENUNCIADO DEL PROBLEMA

Un factor que determina el nivel de desarrollo socioeconómico de un país es su capacidad de generar y distribuir energía eléctrica constantemente a nivel nacional. En Honduras el sistema de distribución de energía eléctrica a nivel nacional es deficiente y genera pérdidas a lo largo de la línea de distribución. El suministro eléctrico no es constante en una buena parte del país, lo cual limita el desarrollo económico en estas regiones ya que las industrias no pueden operar si la energía es inconsistente.

Honduras es un país lleno de carencias y escases porque – entre muchas otras razones ajenas al tema del presente proyecto – carece del conocimiento, del *know-how*, de cómo aprovechar debidamente los abundantes recursos naturales que posee dentro de su territorio nacional. El aprovechamiento adecuado y sostenible de los recursos renovables para generar energía eléctrica en las zonas aisladas del país permitiría tener energía constante en dichas zonas, reduciendo su dependencia a la red nacional y al mismo tiempo se reduciría la demanda eléctrica en la red de distribución.

En Honduras hay proyectos energías renovables fotovoltaicas y eólicas, pero son los proyectos hidroeléctricos que ofrecen la generación más estable y constante durante la mayor parte del año. Para lograr generación eléctrica necesaria en las zonas aisladas no es necesario grandes proyectos hidroeléctricos que tienen un alto impacto ambiental y costo de inversión, esto se puede lograr con proyectos de Centrales de Micro-Generación Hidroeléctrica. La FHIA (Domínguez Suazo, Milton Eduardo, 2012) ha logrado demostrar que con una CMGH es suficiente para energizar una pequeña comunidad rural.

2.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las TTH tienen la capacidad instalada de poder operar con caudales entre 1 [m³/s] y 10 [m³/s], lo cual los hace ideales para zonas que cuentan con un cauce o quebrada lenta, y pueden operar con caídas de agua de baja altura, por lo cual pueden operar como centrales al filo del agua sin la necesidad de la construcción de embalses que alteren el flujo del río. Por estas razones las MCHTTH tienen un bajo impacto ambiental y bajo costo de inversión comparado con otros tipos de turbina.

Lo que se busca realizar con la presente investigación es realizar un modelo en 3D de una TTH para demostrar que una alternativa ideal para generar energía hidroeléctrica en zonas aisladas.

2.3. JUSTIFICACIÓN

A continuación en esta sección se procederá a describir la justificación del proyecto, al igual que un breve detalle de la motivación de porque se tomó esta idea central de investigación y de porque es importante realizar este tipo de proyectos.

2.3.1. JUSTIFICACIÓN

En el mercado hay múltiples tipos de turbinas con capacidad de microgeneración hidroeléctrica. La turbina más usada es la turbina Pelton. Lo que difiere a las TTH de las demás turbinas es el hecho que pueden operar con baja altura de caída de agua y con un variado nivel de caudal del río. Como se detalla en el gráfico de la Fig. 03, las TTH mantienen 70% de eficiencia aun con bajo caudal.

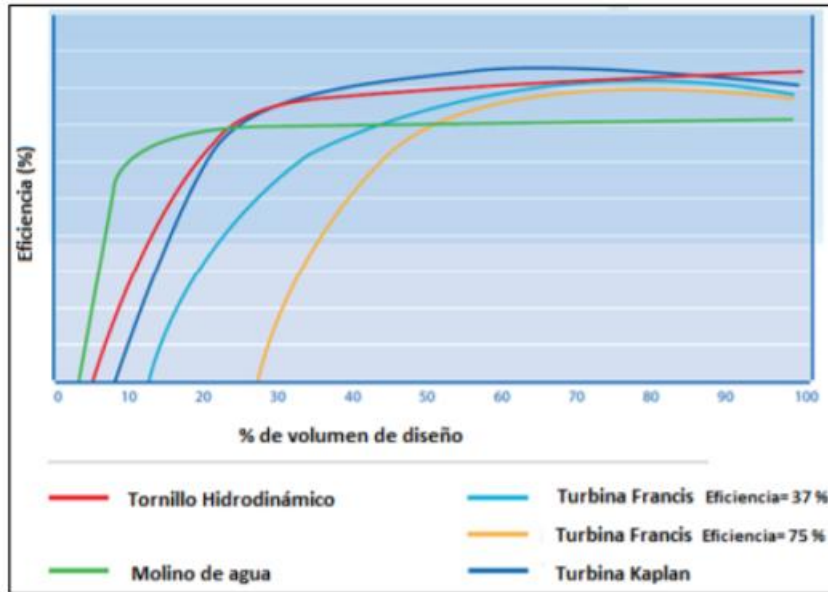


Figura 03. Comparación de eficiencias de turbinas hidrodinámicas. (Jibrail Ortega_Gabriel Valdivia_Trabajo de Investigacion_Bachiller_2018.pdf, 2018)

En proyectos de microgeneración hidroeléctrica en zonas aisladas, ya sean urbanas o rurales, hay factores que limitan el tamaño de las centrales hidroeléctricas y las opciones de turbina. Para tales aplicaciones es común que tengan bajas caídas de agua y poco caudal, especialmente en zonas aisladas urbanas. Por lo cual las TTH muestran tener una clara ventaja sobre las demás turbinas ya pueden mantener altos niveles de eficiencia constantemente sin ser afectados por la variación del nivel de caudal. Igualmente, las turbinas de tonillos hidrodinámicas tienen una ventaja ecológica sobre las otras turbinas ya que no requieren construir un embalse que afecte el caudal del río y la vida marítima dentro del mismo.

2.3.2. MICROGENERACIÓN EN HONDURAS

La Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA) tiene múltiples proyectos de microgeneración hidroeléctrica para el desarrollo de áreas rurales en Honduras (Domínguez Suazo, Milton Eduardo, 2012). Entre ellos los proyectos de microgeneración hidroeléctrica de Las Quebradas y Ni Duermes II, que funcionan con turbinas Pelton de 50 y 40 [kW]. La FHIA optó por

utilizar las turbinas Pelton debido a que son fácilmente adaptables a las condiciones de las aldeas remotas en el Litoral Atlántico.

El organismo de ayuda internacional del gobierno estadounidense USAID realizó proyectos de estudio y desarrollo en múltiples países, entre ellos Honduras. De acuerdo a un estudio realizado por USAID (Nadia Garcia, 2012) se detalla que en Litoral Norte hay once municipios que cuentan con la voluntad y los recursos para participar en proyectos de microgeneración eléctrica. El mismo reporte detalla que los municipios prefieren proyectos hidroeléctricos porque a criterio de ellos la generación hidroeléctrica requiere menor costo de inversión que la generación solar. Para la conclusión del proyecto en Honduras (*USAID Land Tenure PROPARQUE Year 2 Annual Report*, 2016) el USAID logró instalar 185 sistemas fotovoltaicos, 106 sistemas solares prefabricados, y 2,890 sistemas fotovoltaicos para casas y pequeños negocios.

2.3.3. MOTIVACIÓN

El 24 de febrero el rapero senegalés Aliaune Damala Badara Akon Thiam, mejor conocido como Akon, junto con sus amigos Samba Bathily y Thione Niang iniciaron la compañía de energía solar "Akon Lighting Africa" con la esperanza de poder electrificar aldeas a través de África con la esperanza de poder fomentar el desarrollo en estas regiones. Ellos les proveen el equipo de paneles solares a las comunidades y los capacitan para que las mismas comunidades puedan instalarlos y darles el mantenimiento necesario. Con luces de calle y equipos caseros de paneles solares, "Akon Lighting Africa" ha logrado electrificar a 14 países africanos.

Akon es simplemente un hombre normal, y con mucho capital e influencia, que vio un problema que él podía solucionar y la visión para hacer un plan para resolver el problema. Un problema que no solamente afectaba a su familia sino que también afecta a miles de personas en el continente africano. Akon tuvo la voluntad de actuar sobre su visión y hacerla real. Ahora su proyecto es un éxito internacional y todo porque el vio un problema se dijo a sí mismo "Esto ya no puede seguir así. Yo puedo hacer algo al respecto. Yo haré algo al respecto." Los problemas que Akon vio en su país natal se pueden observar en Honduras. Lo que hace falta es la voluntad para resolverlos.

Al igual que en Senegal, en Honduras hay un gran número de zonas aisladas donde tienen grandes dificultades de energía eléctrica de manera constante. Pero a diferencia de Senegal, Honduras tiene mayor riqueza de recursos naturales, solamente que no sabemos aprovecharlos. De acuerdo al informe presentado por el Global Water Partnership sobre los recursos hídricos en Honduras (2020, p. 7), 14 de las 19 cuencas hidrográficas mayores de Honduras desembocan en el litoral Atlántico. Toda agua que fluye es energía cinética que puede ser convertida en energía mecánica, y el humano lleva más de dos mil años utilizando esa energía mecánica para accionar molinos, para irrigación y para romper minerales. En Honduras se debe aprender a proveer correctamente el recurso hídrico.

El presente reporte de investigación servirá para determinar la rentabilidad y eficiencia de un generador hidroeléctrico para las zonas aisladas rurales. Esta investigación no solamente provee una alternativa de generación eléctrica para estas zonas, también ofrece una oportunidad para fomentar el desarrollo en las zonas aisladas e incentivará el cuidado de las fuentes de agua. La introducción de electricidad en las zonas rurales estabiliza las comunidades y reduce el número de personas que deben migrar para poder sostenerse a ellos mismos y a sus familias.

2.3.4. PORQUE ES NECESARIO

En Honduras hay agua pero no se cuida o protege adecuadamente. Cualquier hondureño le podría decir que los ríos son importantes pero no hay una verdadera cultura de conciencia o protección hacia los ríos ya que la mayoría no puede ver más allá de sus necesidades inmediatas. La implementación de centrales micro eléctricas de tornillo tendrá un beneficio inmediato en las comunidades aledañas a la central micro eléctrica ya que el costo eléctrico sería reducido considerablemente. Se especula que si se demuestra la importancia económica del río que alimenta a la central, entonces las comunidades beneficiadas serían motivadas a tomar acciones para cuidar y mantener los ríos.

Entre menos dichas comunidades pagan por su factura eléctrica, mayor disponibilidad de capital tendrán para poder invertir en sus respectivas actividades económicas. Esto les permitirá estimular el desarrollo económico en las comunidades dentro de las zonas aisladas. El tener

suministro constante de energía eléctrica, sin apagones y caídas de voltaje, les permitirá a las comunidades poder trabajar sin interrupciones y sin el riesgo que sus electrodomésticos se vean afectados por los bajones de voltaje.

Adicionalmente, se teoriza que si las zonas aisladas logran independizarse eléctricamente esto podría aliviar parcialmente la demanda eléctrica que se ejerce el sistema eléctrico de Honduras.

2.4. PREGUNTAS DE LA INVESTIGACIÓN

Lo siguiente son las preguntas de investigación del presente reporte.

2.4.1. SISTEMA MECÁNICO

¿Qué factores influyen en el diseño de la turbina de tornillo?

¿Cuál es la relación entre número de threads con la velocidad rotacional del tornillo?

¿Qué tan grande debe o puede ser el tornillo para alcanzar la producción deseada?

¿Qué tipo de materiales son necesarios para la construcción de la turbina?

¿Cuál sería la velocidad de rotación?

¿Cuál será el caudal requerido o caudal de diseño?

¿Cuánto será la potencia máxima?

¿Cuál será el rendimiento?

2.4.2. SISTEMA ELÉCTRICO

¿Cuál es la relación entre el torque del tornillo con los kilowatts generados?

¿Es necesario un multiplicador para poder alcanzar la rotación/generación meta?

¿Qué tipo de motor generador se debe conectar a la turbina?

2.4.3. SISTEMA DE CONTROL

¿Cómo se controla una planta hidroeléctrica?

¿Cuáles son los componentes necesarios para el panel de control?

¿Qué componentes de seguridad instalarían en el panel de control?

¿Cómo sería la regulación del nivel de generación en la turbina?

2.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En la investigación los objetivos tienen la función de determinar la orientación de la investigación y marcar los niveles de avance de la investigación

2.5.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un prototipo de un grupo turbina-generator tipo tornillo como una alternativa de microgeneración hidroeléctrica a través de un modelo en 3D en Autodesk Fusion 360.

2.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivos para el Sistema Mecánico

- Detallar y clasificar los factores que influyen en el diseño la turbina de tonillo.
- Detallar y clasificar los factores que influyen en la capacidad de potencia de la turbina de tonillo.
- Determinar de qué materiales se puede construir una turbina de tornillo hidrodinámico para largo plazo.

Objetivos para el Sistema Eléctrico

- Determinar la capacidad de generación del grupo turbina-generator.
- Determinar los componentes mecánicos y eléctricos necesarios para alcanzar el nivel de generación deseado.

Objetivos para el Sistema de Control

- Investigar y clasificar los componentes de los paneles de control de una central hidroeléctrica.
- Investigar y clasificar los componentes de seguridad eléctrica en los paneles de control de una central hidroeléctrica.
- Investigar cómo se puede regular la generación en la turbina para igualar la demanda.

III. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentará un análisis de la actualidad que rodea las MCHTTH, con un breve contexto histórico, la teoría de sustento, el marco legal con respecto a las leyes en Honduras sobre microgeneración y las entidades que lo regulan.

3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En la actual sección se presenta información sobre la cual se fundamenta la investigación. Dicha información es complementada con datos cualitativos y cuantitativos que soportan la investigación. Se exponen ejemplos de situaciones y proyectos de microgeneración hidroeléctrica nacionales e internacionales que han exitosamente electrificado zonas aisladas.

3.1.1. HISTORIA DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES

Siglo III a.C.

- Mientras estudiaba en la Universidad de Alejandría Arquímedes de Siracusa inventa el Tornillo de Arquímedes como un método para bombear agua a áreas elevadas.
- La bomba de tornillo se convirtió en un éxito inmediato en el mundo griego y romano ya que permitió irrigar y cultivar tierra que previamente no se podía utilizar por la falta de agua en dicha tierra.

Siglo XIV hasta la actualidad

- Empezando en el siglo XIV Los Países Bajos inició proyectos de reclamación de tierra que está bajo cinco a diez metros de agua.
- Uno de los métodos utilizados para bombear el agua es el Tornillo de Arquímedes.
- Hoy en día el país aún mantiene instalaciones de bombeo con tornillo de Arquímedes para poder controlar inundaciones.

Siglo XX

- Con la segunda revolución industrial viene la electrificación de las industrias y de las ciudades. Lo cual motivó a la invención de múltiples métodos de generación eléctrica.

- En 1916 en USA se patentó la primera TTH para generación hidroeléctrica.

Siglo XXI

- Actualmente las CHTTH están pasando por un periodo de reingeniería. En múltiples países hay un creciente número de diseño e instalación de CHTTH de diferentes tamaños.

3.1.2. MACRO ENTORNO

En la actualidad hay múltiples proyectos de generación hidroeléctrica que utilizan un tonillo hidrodinámico. Pero lastimosamente todos estos proyectos ubicados en Europa, USA y Japón.

Japón

Un joven ingeniero llamado Masaya Sumino inventó el "PicoPica10", un generador de tonillo hidrodinámico de un metro de largo que es tan liviano que puede ser transportado por una persona (*Renewable Energy*, 2019). Su invento solo es capaz de producir 10 W es utilizado para electrificar cercos eléctricos de para granjas, para suministrar la energía del alumbrado público de carreteras rurales y para educar a niños de primaria sobre generación hidroeléctrica.

Inglaterra

En el 2013 se comisionó un proyecto de suministro de energía renovable para el castillo de Windsor de la familia real inglesa. Esta planta hidroeléctrica es capaz de producir 270 kW. Esta planta es la segunda planta de este tipo de turbina con mayor capacidad en Inglaterra. La planta de turbina de tornillo hidrodinámico de mayor capacidad está en Devon, Totnes y tiene una capacidad de producción de 320 kW. Ambos proyectos fueron instalados por la empresa MannPower (2020). Dicha empresa se especializa en el diseño y construcción de turbinas de tonillos hidrodinámicas.

Estados Unidos de América

A pesar de haber hecho historia al ser el país pionero con la revolución eléctrica y desarrollo de las corrientes directa y alterna, y haber logrado avances al ser primeros en muchos campos de la generación eléctrica e hidroeléctrica, los Estados Unidos de América (USA) no tiene mucho en el campo de tonillos hidrodinámicos. Pero en los últimos años empresa de desarrollo energético

como Percheron Power se han aliado con universidades (Uthah State University, 2018) para realizar investigaciones sobre las capacidades de generación de las turbinas hidrodinámicas. Es un redescubrimiento de la tecnología del pasado que tiene la capacidad de impactar en las metas de generación verde tanto en USA como en Honduras.

3.1.3. MICRO ENTORNO

El Salvador

De El Salvador se contó con una tesis de la Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura titulada "DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL TORNILLO DE ARQUÍMEDES" (2011).

Ecuador

Para efectos de la investigación se encontraron de Ecuador una tesis universitaria sobre el diseño y fabricación de una turbina de tornillo Arquímedes para picogeneración. De la Universidad Técnica de Ambato Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica se utilizó el proyecto "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA" (2019).

3.1.4. ENTORNO INTERNO

En Honduras no se encontró un ejemplo de un proyecto hidroeléctrico utilizando una turbina de tornillo de Arquímedes.

3.2. TEORÍA DE SUSTENTO

En la presente sección se presenta y describirá la información técnica sobre la cual se realizó el proyecto de investigación. Se definen los términos técnicos y describe las clasificaciones de generación y turbinas hidroeléctricas, al igual que su relación con el reporte. Historia de la Energía Hidroeléctrica

El aprovechamiento de la fuerza del agua no es un concepto nuevo para los humanos. El primer ejemplo del aprovechamiento de la energía de un río como una fuente de poder son las

Ruedas Hidráulicas, inventadas por los griegos entre los siglos 3ro y 1ro a.C. (Mench & Oleson, 1985, pg. 325). El diseño general de la rueda de agua se mantuvo sin cambiar por dos siglos hasta mediados del siglo 18 que fue reingeniado en la primera revolución industrial (Bohstedt, 1986). En 1880 se demostraron los primeros ejemplos del uso de una turbina hidroeléctrica para llevar producir luz en un teatro en Grand Rapids, Michigan USA y varias calles de Niágara Falls, New York, USA. Pero ambos utilizaban corriente directa por lo cual la electricidad no podía cruzar grandes distancias hasta que el desarrolló la corriente alterna y transformadores hizo posible la transmisión de energía a través de largas distancias (Marincic, 1982). En 1892 se completó la construcción de la Planta Hidroeléctrica en Redland, California, la primera instalación comercial de una planta hidroeléctrica de corriente alterna trifásica (*History of Hydropower*, 2018). La energía de esta planta hidroeléctrica viajaba 14 millas para poder proveer de energía a la ciudad de Pomona, California.

3.2.2. CLASIFICACIÓN DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La clasificación de las plantas hidroeléctricas se basa en dos criterios: su capacidad de producción y la tecnología de generación.

3.2.1.1. SISTEMAS DE MICROGENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) define a la microgeneración hidroeléctrica como una planta hidroeléctrica que produce entre 5 kW y 100 kW de energía eléctrica (Hamadion, 2012). Típicamente las plantas de microgeneración son usadas para poder suministrar electricidad a comunidades rurales pequeñas que son remotas y están dentro de una zona aislada.

Una planta de microgeneración hidroeléctrica requiere los componentes básicos de cualquier proyecto hidroeléctrico como un canal o tubería de agua, una turbina, un generador y el cableado. Lo que difiere es en las dimensiones de los componentes ya que el tamaño de la planta es proporcional a la cantidad de generación.

- **Factores a Favor de la Microgeneración Hidroeléctrica**

Es energía renovable y es constante. Una planta hidroeléctrica puede producir energía todo el año, claro que con variaciones en el nivel de generación dependiendo de las estaciones del clima. Siempre y cuando hay agua fluyente disponible, la planta podrá producir energía.

Reduce la dependencia a los hidrocarburos y el costo energético. Las plantas termoeléctricas generan energía eléctrica a partir del calor liberado por la quema de combustibles fósiles o biomasa. Para poder sostener el ritmo de consumo y generación las plantas termoeléctricas deben constantemente comprar combustibles, lo cual incurre gastos por compra, transporte y almacenamiento. Sin mencionar que los combustibles fósiles deben ser almacenados en contenedores especiales para evitar contaminación. Todo esto genera en una dependencia en el país por los combustibles que deben ser importados de otros países, y al mismo tiempo aumenta el costo de producción de energía eléctrica. En cambio el costo de la energía producida de una planta de microgeneración hidroeléctrica es significativamente menor ya que no requiere importación transporte de combustibles, no requiere silos almacenamiento especial. Con un costo de generación significativamente menor, una planta de microgeneración hidroeléctrica puede producir suficiente energía para una comunidad en una zona aislada a un precio accesible para ellos.

El impacto ambiental es mínimo. Las plantas de microgeneración hidroeléctrica, en su mayoría, tienden a ser plantas a filo de agua y por lo tanto no requieren embalse enorme. Al no tener que construir un embalse no interrumpe con el flujo de los ríos, no cortan el movimiento de los peces que deben y de los nutrientes que fluyen con el río a zonas río debajo de la represa (Ligon et al., 1995). Sin mencionar que por construir un embalse se pueden inundar una significativa extensión de tierra, desplazando a los animales y comunidades de humanos que vivían donde ahora está bajo agua. Hoy en día los proyectos de energía de mayor escala reciben fuerte resistencia por parte de los grupos ambientales precisamente por el fuerte impacto que los proyectos pueden tener en el ambiente.

- **Factores en Contra de la Microgeneración Hidroeléctrica**

Producción de energía puede ser fluctuante dependiendo de las estaciones del año. La generación de una planta de microgeneración hidroeléctrica puede ser constante en el sentido

puede estar generado día y noche sin necesidad de detenerse, a parte de los periodos de mantenimiento, siempre depende del nivel de caudal en el río. En temporadas secas o de verano el nivel del caudal puede bajar significativamente, reduciendo la capacidad de generación. En cambio los niveles de generación más altos se registran en la temporada lluviosa. Sin embargo, si debido a una tormenta o huracán el caudal del río se vuelve demasiado violento y/o arrastra una gran cantidad de escombros, entonces se limitará o detendrá la generación ya que se pone en riesgo las turbinas.

Impacto en niveles de oxígeno en el agua (*Everything You Should Know About Micro Hydro Power Plants - ProQuest, 2019*). Este impacto no es tan profundo en las plantas de microgeneración hidroeléctrica, pero siempre es un riesgo latente. Después de pasar por las turbinas el agua de un río puede tener un nivel reducido de oxígeno. Esto a su vez tiene un impacto en la calidad de vida de los peces.

3.2.1.2. CLASIFICACIÓN POR TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN

Las plantas hidroeléctricas son también clasificadas por la tecnología de operación con la cual captan y dirigen el agua hacia las turbinas. La manera en que captan el agua también define el tipo de turbina que se puede utilizar. Las **centrales a filo de agua** no requieren utilizar un embalse que cambie el flujo del agua ya que captan el agua necesario mediante un bocatoma. Este bocatoma redirecciona parcialmente el agua del río necesaria para la operación del río. Los niveles de producción dependen del nivel del río, el cual varía dependiendo de las estaciones del año. Para poder mantener producción estable durante todo el año las centrales a filo de agua pueden optar por construir un embalse pequeño que mantenga un reservorio pequeño de agua y que al mismo tiempo no afecte el flujo del río. Este tipo de centrales son pequeñas lo cual las hacen ideales para proyectos pequeños que requieren menor tiempo de construcción.

Las **centrales con embalses** son proyectos de mayor envergadura toman un mayor tiempo de construcción y tienen mayor explotación del área. Este es el tipo de central hidroeléctrica que tiene el mayor impacto en el ecosistema de los ríos ya que inundan el área río arriba del embalse y detienen el flujo de nutrientes en el río (Ligon et al., 1995). Lo que hace atractivos este tipo de

proyectos es la alta generación de electricidad que producen. La energía producida es suficiente para abastecer las necesidades eléctricas de una región entera de un país.

3.3. MARCO LEGAL

3.3.1. DECRETO NO. 404-2013

El Decreto No. 404-2013 (García, 2014), y su reforma Decreto No. 61-2020 (Neda, 2020), es la Ley General de La Industria Eléctrica en Honduras. En la misma se establece las obligaciones y funciones de la Comisión Reguladora de Energía Eléctrica (CREE). En el mismo decreto se establece los reglamentos para las Empresas Generadoras de Energía, las Empresas Transmisoras, la Red de Transmisión y las Empresas Distribuidoras.

3.3.2. FONDO SOCIAL DE DESARROLLO ELÉCTRICO (FOSODE)

Administrada por la ENEE, FOSODE fue creada en la Ley Marco de 1994 con el propósito de promover el desarrollo de electrificación de Honduras. FOSODE se encarga de dirigir los estudios y las obras de electrificación en las áreas de interés social. Estas áreas son las comunidades rurales donde no hay electricidad y las comunidades marginales en zona urbana donde la red eléctrica es irregular y es común el hurto de energía.

Este fondo recibe aportes anuales de USD 1 M del gobierno, la ENNE, más préstamos y donaciones.

3.3.3. OFICINA DE ELECTRIFICACIÓN SOCIAL (OES)

Creada por la ENEE. La OES elaboró Plan Nacional de Electrificación Social (PLANES) con prioridad inicial de reducir el costo por cada nueva conexión a la red eléctrica nacional. PLANES incluye extensiones de la red y electrificación de áreas aisladas, con énfasis en el uso de energía renovable para cumplir su meta.

IV. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describirán los temas de enfoque, técnicas de investigación y la metodología con las cuales fue posible guiar y darle forma a la investigación.

4.1. ENFOQUE

En esta sección del capítulo de Metodología se define el tipo de enfoque de la investigación actual. Este enfoque fue definido con la información encontrada en el libro de *Metodología de la Investigación* (Sampieri Collado Lucio, 2014).

Se determinó que el enfoque de la investigación sería un enfoque cuantitativo debido al proceso en que se desarrolla la investigación. Dicho proceso es secuencial, partiendo desde el desarrollo de la idea central y el planteamiento del problema, derivando de ella las preguntas de investigación y los objetivos de la misma. Los cuales ayudan a formar el marco teórico y a delinear un plan para la elaboración del diseño. Para que al final se realiza una recolección de los datos para poder analizar los resultados y de este análisis poder extraer las conclusiones.

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

4.2.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Las variables independientes son las variables que representan un factor que modifica la investigación. En el caso de la investigación actual, para función del diseño de la turbina se determinó que el nivel de caudal disponible ya que este factor principal que limita el tamaño de la turbina y la capacidad de generación en [kW].

4.2.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Las variables dependientes son las variables cuyo valor depende del valor de las variables independientes. Entre las variables dependientes tenemos los factores específicos de diseño y generación:

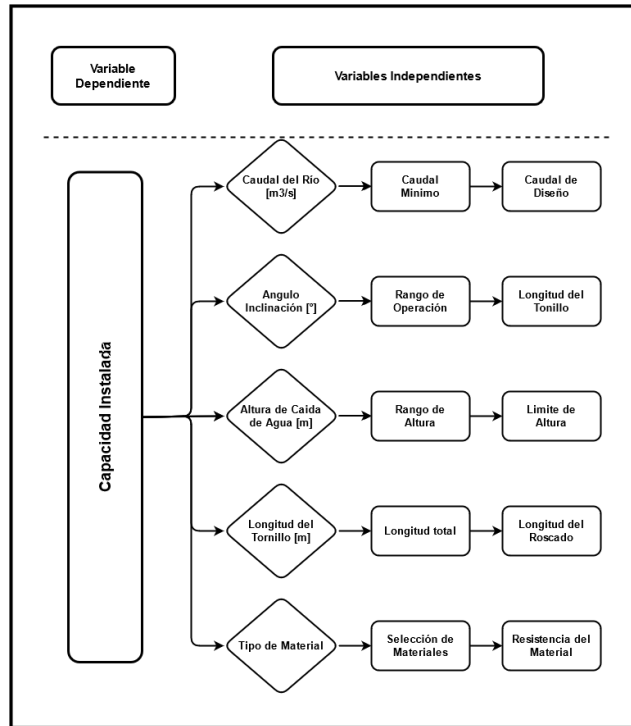


Figura 04. Diagrama de Variables de Investigación (Elaboración Propia)

4.3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

En la presente sección se procederá a describir las técnicas y herramientas utilizadas para el desarrollo de la investigación.

4.3.1. SIMULACIONES

Para realizar las simulaciones necesarias del diseño se utilizó el programa Autodesk Fusion 360. Autodesk Fusion 360 es un software 3D CAD, CAM y CAE que es uno de los programas de diseño computarizados más usados por principiantes y profesionales por su interfaz fácil de aprender, su corta curva de aprendizaje, su proceso simple de instalación y su plataforma basada en la nube.

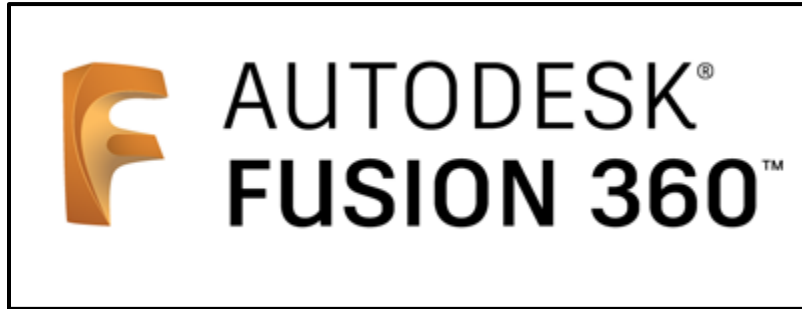


Figura 05. Logo oficial de Fusion 360.

4.3.2. MATRIZ DE DECISIÓN O MULTICRITERIO

Para elaborar la matriz de decisión es necesario primero todos los factores críticos necesarios que podrían afectar el diseño y la vida útil de la turbina.

4.4. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Considerando que se trabajó en el diseño y la creación de un sistema mecatrónico, integrando cinérgicamente elementos de elementos mecánicos con elementos eléctricos y elementos de control, se optó trabajar con el modelo de diseño en W. El modelo en W está basado en el modelo en V, pero esta ha sido rediseñado para poder ser adaptado para que se pueda trabajar con disciplinas multidisciplinarias. Este modelo permite separar cada sistema en componentes individuales que a su vez pueden ser diseñados paralelamente y luego integrados en el sistema general (Barbieri et al., 2014). La siguiente figura 000 muestra las cinco fases del modelo en W.

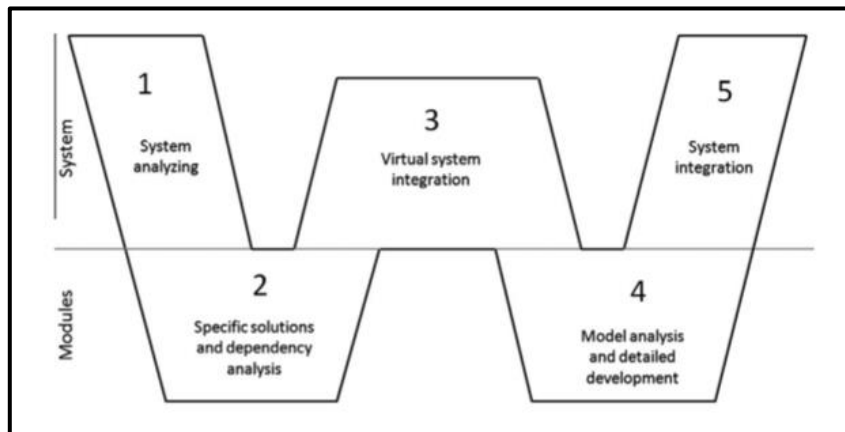


Figura 06. Las cinco fases del modelo en W (Barbieri et al., 2014)

Para funciones de la investigación se puede utilizar la división del sistema del modelo en W propuesto por Barbieri, Fantuzzi y Borsari (2014) en tres niveles jerárquicos: nivel de sistema, nivel de módulo, y nivel de componente.

4.4.1. NIVEL DE SISTEMA

En el nivel sistema tenemos los sistemas de Control, Sistema Mecánico y Sistema Eléctrico. El sistema mecánico es donde el agua hace girar la turbina, la cual a su vez hace girar el generador. Es donde la energía potencial del agua se convierte en energía cinética por la TTH. En el sistema eléctrico sucede la conversión de energía cinética a energía eléctrica. Y por último en el sistema de control se controla y regula el trabajo de la TTH.

4.4.2. NIVEL DE MÓDULOS

En este nivel tenemos los módulos específicos de cada sistema.

Sistema Mecánico – Módulo del Tornillo, Módulo Rejilla

Sistema Eléctrico – Módulo del Generador

Sistema de Control – Módulo del Panel de Control, Módulo del Compuerta Reguladora

4.4.3. NIVEL DE COMPONENTES

En este nivel ya podemos ver los componentes individuales de cada Módulo.

Módulo del Tornillo – El Tornillo Hidrodinámico

Módulo Rejilla – Rejilla para evitar el ingreso de basura y madera en el tornillo.

Módulo del Generador – El Multiplicador y el Generador

Módulo Panel de Control – Sensores de caudal, sensores de velocidad para el tornillo,

Módulo Compuerta Reguladora – Compuerta que regula el ingreso del agua, sensor de altura para el nivel de agua.

4.5. ECUACIONES MATEMÁTICAS

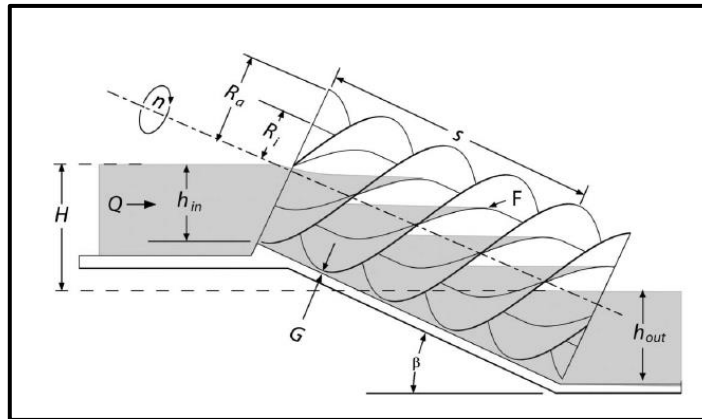


Figura 07. Vista lateral de un Tornillo de Arquímedes en la cual se ilustra la geometría básica de un Tornillo de Arquímedes. (Straalsund et al., 2018)

Para el cálculo de potencia de generación eléctrica, P_{th} , en [kW] se utiliza la ecuación (1).

$$P_{th} = \rho * g * Q * H \quad (1)$$

En la cual:

ρ = densidad del agua, 1000 [kg/m³];

g = gravedad, 9.81 [m/s²];

Q = caudal del agua, [m³/s]

H = Altura de caída de agua, [m]

Torque $T = \frac{60P_M}{2\pi n}$

Eficiencia $\eta = \frac{P_M}{P_{th}}$

Caudal de Torque $n \leq \frac{50}{(2R_o)^{\frac{2}{3}}} (min^{-1})$

Velocidad Rotacional $n \leq \frac{50}{(2R_o)^{\frac{2}{3}}} (min^{-1})$

Longitud del tornillo $L_e = \frac{H}{\text{sen}\beta}$

Torque $T = \rho * g * L_e * A * Yc * \text{sen}(\beta) * \tan(\alpha)$

$$\text{Velocidad Angular } \omega = \frac{Q \cdot \tan(\alpha)}{A \cdot Y_c}$$

De acuerdo a un reporte de la FHIA sobre MCH (Domínguez Suazo, Milton Eduardo, 2012), ellos lograron proveer electricidad a una comunidad con un generador de 12.5 [kW]. Con el cual lograron iluminar 40 viviendas, 1 escuela y 2 iglesias. Con esto en mente, para poder demostrar la efectividad y factibilidad de las TTH se trabajó con la meta de poder generar 12.5 [kW].

Para encontrar el caudal necesario para producir 12.5 [kW] se utiliza la ecuación (2) que está basada en la ecuación (1).

$$Q = \frac{P_{th}}{\rho * G * h} \quad (2)$$

Como se demuestra en la figura 000, las TTH pueden operar con caudales bajos de menores de 1 [m³/s] hasta 20 [m³/s], y con caídas de agua de entre 1 [m] y 10 [m]. El que puedan operar con caídas agua mínimas y caudales bajos, comparados con otros tipos de turbinas permite a las TTH ser turbinas a ser la opción viable para operaciones de menor escala y donde no se puede realizar grandes excavaciones de tierra.

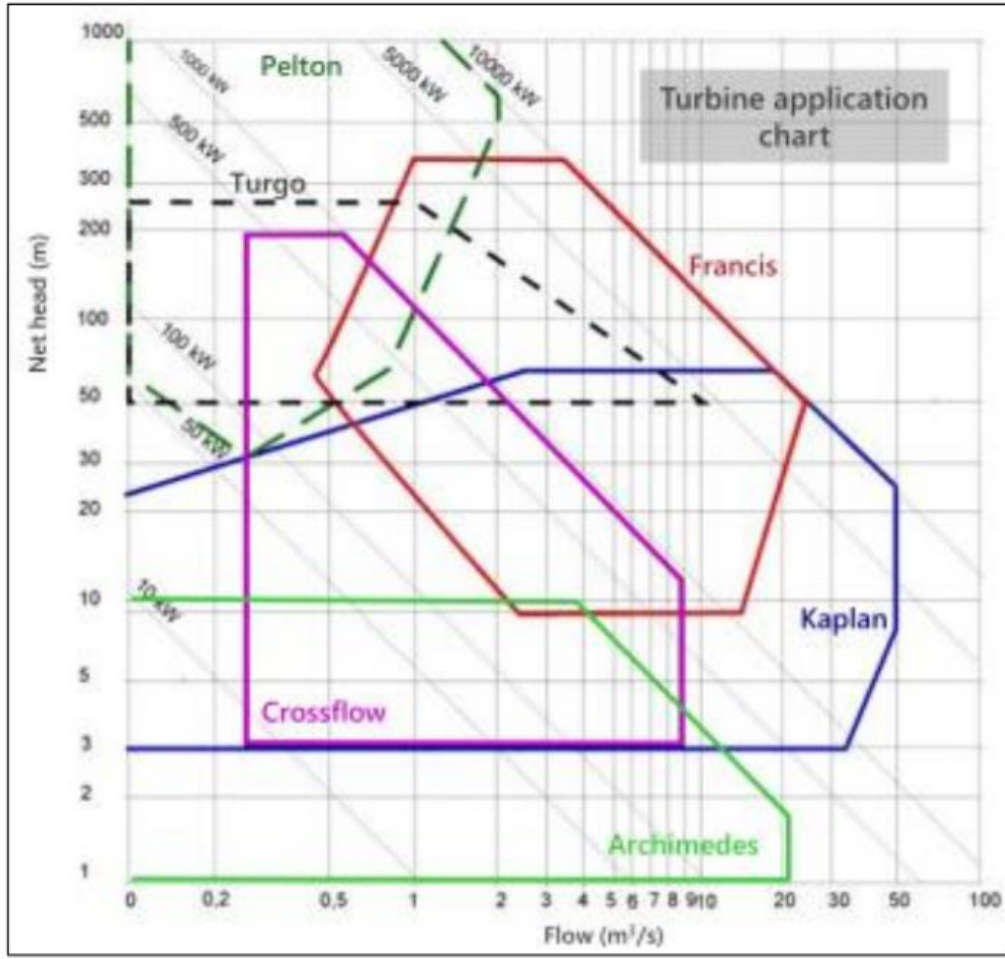


Figura 08. Tabla de Rango de Operaciones de Caudal por turbina. (Prophet, 2015)

Ya dentro de la TTH hay múltiples caudales que se consideran para calcular el caudal operativo Q . como se demuestra en la ecuación (3), Q es el caudal total resultante de la suma del caudal de torque Q_w , caudal del espacio entre las álabes y canal Q_G , caudal de fricción Q_F , caudal de pérdida de agua Q_P , y el caudal Q_O cuando se llena arriba del límite óptimo.

$$Q = Q_w + Q_G + Q_O + Q_F + Q_P \quad (3)$$

Siendo la pérdida de caudal por fricción negligente y la pérdida de agua resultante cuando el agua dentro de una cubeta cae hacia la cubeta inferior, está pérdida se recupera con el agua de la cubeta superior. Por lo tanto la ecuación (3) se puede detallar de acuerdo a la ecuación (4)

$$Q = Q_w + Q_G + Q_O \quad (4)$$

Se define como cubeta al volumen de agua que hay dentro de cada paso del tornillo. Respecto al volumen de agua dentro del tonillo, se define V_B como el volumen de cubeta de agua por rotación. En cambio V_U es el volumen de agua por rotación, en otras palabras es el volumen de agua contenido dentro del paso del tonillo. Con estos volúmenes se puede determinar que el factor de llenado φ es igual a V_U/V_B . Se considera que el tornillo está sobrellenado si $\varphi > 1$ y subllenado si $\varphi < 1$. Con la ecuación (5) se puede utilizar el V_U para encontrar el caudal de torque Q_w .

$$Q_w = \frac{n}{60} * V_U \quad (5)$$

La longitud del tornillo se establece con la ecuación (6).

$$L_e = \frac{H}{\text{sen}\beta} \quad (6)$$

Cuando se diseña un tonillo hidronómico comercial para uso en generación eléctrica es común usar las proporciones $R_i/R_a = 0.5$ y $S/2R_a = 1$.

Para funciones del presente proyecto se utilizó el ángulo $\beta = 24^\circ$ como el ángulo de inclinación ya que es el mismo ángulo utilizado en el proyecto de investigación "Experimental Evaluation of Advance Archimedes Hydrodynamic Screw Geometries" de Straalsund, Harding, Nuernbergk y Rorres. El cual está citado como uno de los reportes que sirvió de referencia para la investigación.

Tabla 02. Tabla de Parámetros del Tamaño del Tonillo

Parámetro	Símbolo	Unidad
Numero de Álabes	N	
Radio Externo	R_o	m
Radio Interno	R_i	m
Paso de Tornillo	S	
Ángulo de Inclinación	β	°, grados
Longitud	L	m

4.6. SELECCIÓN DE GENERADOR

Los generadores son equipos cuya función es transformar energía mecánica en energía eléctrica. En el generador el voltaje es generado en función de la longitud del conductor, de la velocidad rotacional y de la densidad del flujo eléctrico. El tipo de generador más utilizado en la industria de generación eléctrica es el generador de inducción debido a su configuración simple y bajo precio.

El diseño de un generador para una turbina eléctrica depende de si la conexión es directa o indirecta, y de si es síncrono o asíncrono. Si el generador está conectado directamente a la red de corriente alterna, entonces la conexión es directa. Si la corriente del generador debe pasar por una serie de dispositivos eléctricos que ajustan el voltaje para igualarlo al de la red, entonces la conexión es indirecta.

De acuerdo a la red que se debe alimentar se determina el sincronismo del generador:

- 1) Generador Síncronico: Generadores cuya rotación n está vinculada con la frecuencia f de la red de corriente alterna. Su rotor está compuesto por un electroimán. El motor gira a la misma velocidad que el campo magnético.
- 2) Generador Asíncronico: también conocidos como generadores de inducción, sus rotores pueden ser tipo jaula de ardilla o tipo bobinado. El rotor gira de manera retrasada respecto al campo magnético rotatorio, debido a que el electroimán tiene un núcleo de hierro y el devanado que debe actuar como un imán.

4.7. SELECCIÓN DEL MULTIPLICADOR

Debido a que los rodets de las turbinas de baja potencia generalmente giran a menos de 400 rpm es necesario emplear el uso de un multiplicador ya que los alternadores estándar requieren girar a 100-1500 rpm. Los multiplicadores son clasificados en tres categorías dependiendo del tipo de engranaje utilizado en su construcción: cónico, paralelo y planetario (*Alberto Mejía, 2011*).

4.7.1. MULTIPLICADOR DE EJE PARALELO

Este tipo de multiplicador está diseñado para aumentar la velocidad angular del eje de entrada al eje de salida. Los multiplicadores de ejes paralelos son una colección de etapas de engranajes simples, en la cual cada etapa está compuesta por dos ejes, un engrane y un piñón.

4.7.2. MULTIPLICADOR DE EJE CÓNICO

Es un multiplicador de dos etapas, una etapa con engranajes planetarios y una segunda etapa con engranajes cónicos, que está limitado para pequeñas potencias. Los engranajes cónicos permiten reenviar la potencia a 90 grados.

4.7.3. MULTIPLICADOR DE EJE PLANETARIO

Los multiplicadores planetarios tienen un diseño más complicado pero compacto que los demás multiplicadores pero esto le permite tener mayores ventajas que los ejes paralelos. Está compuesta por tres componentes en movimiento por etapa, incluye un engranaje planetario y un piñón. Su diseño compacto los vuelve adecuados para potencias mayores de 2 MW.

4.8. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En esta sección se presentará el diagrama de Gantt en el cual se despliega el cronograma de las actividades del proyecto de investigación.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se presentarán los resultados de los análisis y cálculos previamente detallados.

5.1. DIMENSIONES DE DISEÑO

Para poder realizar un buen diseño de una TTH se tiene como parámetros iniciales el ancho del canal, profundidad disponible, la altura del agua, y medida de velocidad del agua. Lo cual fue una limitante para esta investigación ya que debido a la pandemia no se puede realizar visitas de campo. Por lo cual los parámetros de diseño fueron determinados en base al nivel de generación deseado.

5.1.1. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO

Con el radio de los álabes siendo 0.3 [m] se puede determinar el área del álabe es:

$$A = \frac{3}{8}\pi R^2 = \frac{3}{8}\pi(0,3)^2 = 0.1060 [m^2]$$

Siendo la ecuación del torque la ecuación $T = \rho * g * L_e * A * Y_c * \text{sen}(\beta) * \tan(\alpha)$, se determina que el torque es:

$$T = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 3[m] * 0.0471[m^2] * 0.099[m] * \text{sen}(30) * \tan(42) = 642.04[Nm]$$

$$T = 139.04 [Nm]$$

La velocidad angular es determinada con la ecuación $\omega = \frac{Q * \tan(\alpha)}{A * Y_c}$

$$\omega = \frac{Q * \tan(\alpha)}{A * Y_c} = \frac{0.8495 \left[\frac{m^3}{s} \right] * \tan(42)}{0.0471[m^2] * 0.099[m]} = 164.038$$

$$\omega = 164.38 \frac{rad}{s}$$

Teniendo el Torque (T) se puede determinar la Potencia Mecánica (P_M):

$$T = \frac{60P_M}{2\pi n} \rightarrow P_M = \frac{T * 2 * \pi * n}{60}$$

$$P_M = \frac{139.04 * 2 * \pi * 2}{60} = 29.12[kW]$$

Tabla 03. Tabla de Parámetros del Tamaño del Tonillo

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Numero de Álabes	N	1	
Radio Externo	R _o	0.6	m
Radio Interno	R _i	0.3	m
Paso de Tornillo	S	0.1428	m
Ángulo de Inclinación	β	30	°, grados
Longitud Hélice	L _e	3	m
Angulo Inclinación Álabe	α	42	°, grados
Radio de Álabes		0.3	m

Caudal del Río

- Caudal Mínimo

Para funciones de una TTH el caudal mínimo sería el caudal de torque, caudal necesario para iniciar la rotación del torque:

$$Q_w = \frac{n}{60} * V_u$$

$$n \leq \frac{50}{(2R_o)^{2/3}}$$

En el cual V_u es el volumen en N cubetas, N siendo el número de hilos de alabes en el tornillo y con cubeta se refiere al espacio entre los alabes del tonillo en los cuales se llena de agua. El volumen de agua en cada cubeta se define con V_B.

$$V_u = N * V_B$$

$$V_B = \frac{\pi(R_o^2 - R_i^2) * S}{N}$$

$$V_B = \frac{\pi(0.6^2 - 0.3^2) * 0.1428}{1} = 0.0269 [m^3]$$

$$V_u = 1 * 0.0269 = 0.0269 [m^3]$$

$$n \leq \frac{50}{(2R_0)^{2/3}} = \frac{50}{(2 * 0.6)^{2/3}} = 44.2774$$

$$Q_w = \frac{44.2774}{60} * 0.0269 = 0.0198$$

El caudal mínimo para que pueda iniciar operación el tornillo es $Q_w = 0.0198 [m^3/s]$.

- Caudal Diseño

Para una TTH el caudal teórico máximo es determinado con la siguiente ecuación de Q_D :

$$Q_D = 1.8(D_0 - 0.22R_0) * R_0^{1.5}$$

$$Q_D = 1.8(1.2 - 0.22(0.6)) * 0.6^{1.5} = 0.8939$$

$$Q_D = 0.8939 [m^3/s]$$

Longitud de Tornillo

La longitud de la hélice del tornillo es determinada por la altura de caída de agua (h) y el ángulo de inclinación (β).

$$L_e = \frac{H}{\text{sen}\beta} = \frac{1.5}{\text{sen}(30)} = 3 [m]$$

La longitud de la hélice no es la longitud total del tornillo. Es en otros términos la longitud operacional del tornillo.

5.2. DIMENSIONES DE GENERACIÓN

Siendo $P_{th} = 12 [kW]$ la potencia a igualar entonces basándose en la fórmula de potencia P_{th} para determinar el caudal necesario usando la ecuación (2).

$$Q = \frac{P_{th}}{\rho * G * h} \quad (2)$$

$$Q = \frac{12 [kW]}{1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right] * 9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right] * 1.5 [m]} = 0.8495 [m^3/s]$$

Tabla 04. Tabla de Parámetros de Generación

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad del Agua	ρ	1000	[Kg/m ³]
Gravedad	G	9.81	[m/s ²]
Caudal	Q	0.8495	[m ³ /s]
Altura de Caída	H	1.5	[m]
Poder Generado	P _{th}	12.5	[kW]

Para la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica es preferible el uso de un generador trifásico con motor asíncrono. Siendo aplicación de campo y que la energía producida entrará directamente a la red de la comunidad, no se requerirá que la corriente generada pase por una serie de dispositivos de transformación. Por lo cual el generador requerirá una conexión trifásica para poder ser conectado directamente a la red de corriente alterna. Los motores asíncronos tienden a ser más robustos que sus contrapartes síncronos, no requieren mantenimiento complejo, y su funcionamiento no requiere circuito independiente. Lo cual es ideal para aplicaciones rurales. Altamente utilizado en turbinas eólicas y en hidrogenación pequeñas. Debido al nivel bajo de potencia que es producida en microgeneración, para la turbina será necesario implementar un multiplicador de eje paralelo.

5.3. DISEÑO DE LA TURBINA DE TORNILLO HIDRODINÁMICO

A continuación se presentará el diseño del TTH y del canal del TTH.

Turbina de Tornillo Hidrodinámico



Figura 10. Imagen Renderizado del Tornillo Elaborado en Fusion 360

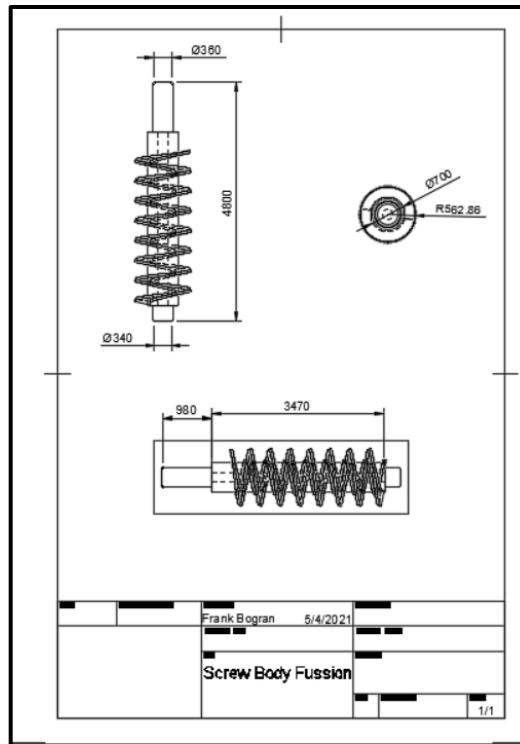


Figura 11. Dibujo en 2D del Tornillo Elaborado en Fusion 360

Canal del Tornillo

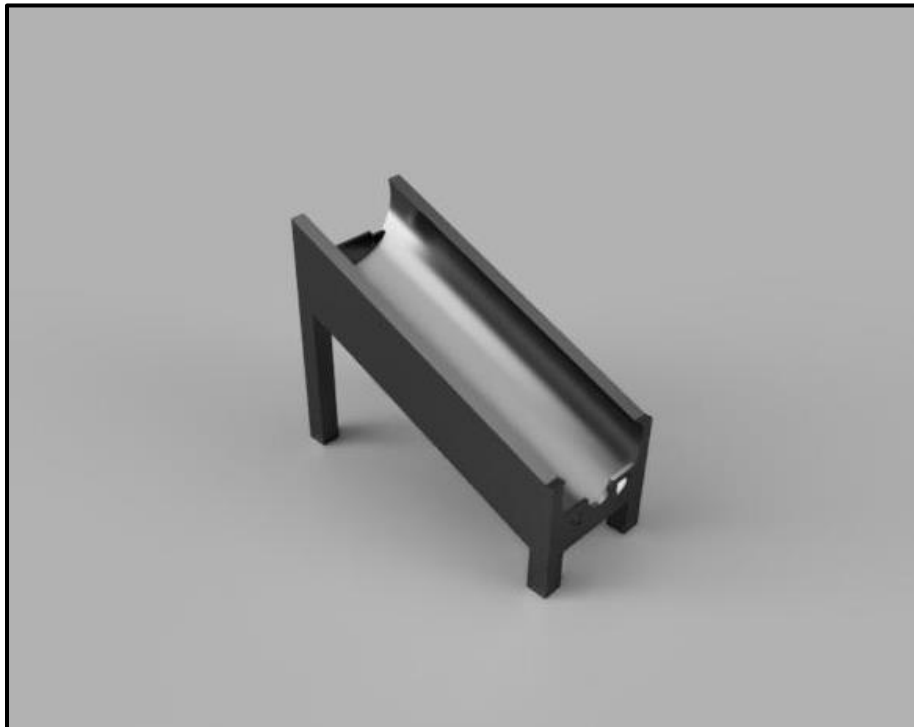


Figura 12. Imagen Renderizado del Canal del Tornillo Elaborado en Fusion 360

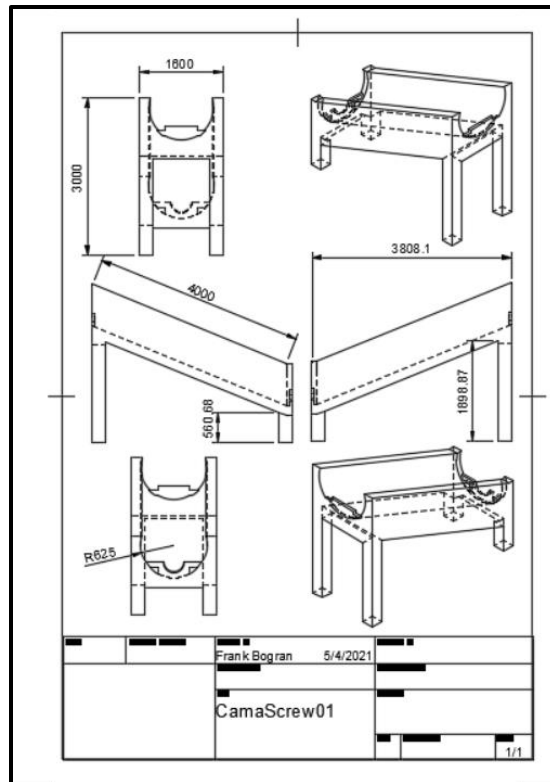


Figura 13. Dibujo en 2D del Canal del Tornillo Elaborado en Fusion 360

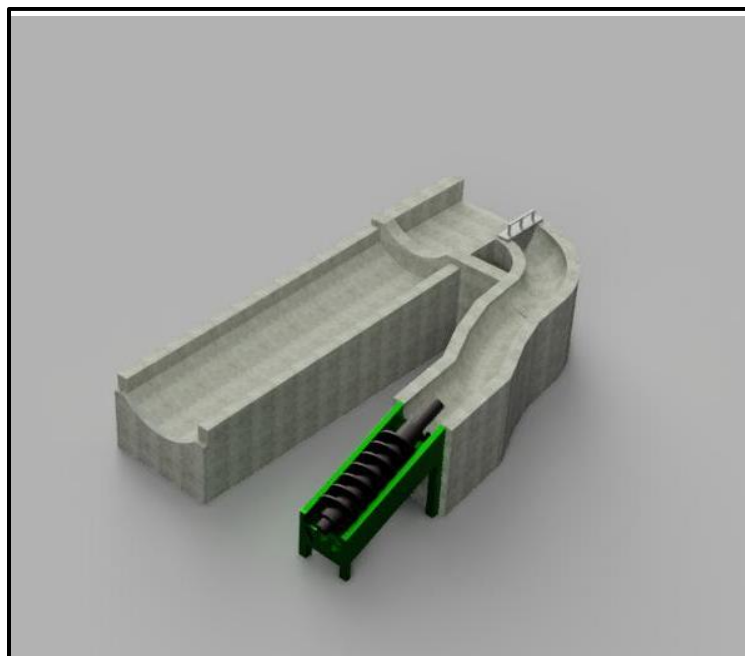


Figura 14. Imagen del Tonillo y Canal Elaborado en Fusion 360

5.4. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

5.4.1. REQUERIMIENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL EN UNA PLANTA ELÉCTRICA

El reporte de "*Future Power Plants*" Joerg Orth (2007) detalla que para la integración de sistemas eléctricos en un sistema de control este último debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Monitoreo

En el cuarto de control se debe llevar un monitoreo constante del sistema eléctrico con gráficos disponibles detallando el estatus general o parcial del sistema eléctrico.

- Operación Manual (Remota)

La operación manual de los dispositivos eléctricos tiene que ser apoyada por paneles de control en el dispositivo o en el cuarto de control.

- Operación Automática

Utilizar un interfaz común para poder comunicar el controlador automático con los dispositivos eléctricos que interactúan con el proceso de control.

- Registro

El sistema de control de la planta debe llevar un registro sobre todas las señales, alarmas, eventos y valores medibles que sucedan en la planta. Esto es con el propósito de poder realizar documentación, reportes y análisis de todo lo que sucede en la planta.

- Secuencia-de-eventos-en-planta

En caso de fallas en el sistema eléctrico es necesario llevar un registro cronológico de la secuencia-de-eventos en toda la planta. De esta manera se pueden identificar los puntos que se pueden mejorar para evitar que las fallas tengan impactos en la operación general de la planta.

- Calculo de Características de Desempeño

El sistema de control debe de ser capaz de realizar cálculos basados en los valores que salen de los dispositivos eléctricos.

- Gestión de Activos

Mantener un control de mantenimiento de la planta teniendo un registro de toda información relevante al mantenimiento de los dispositivos.

- Ingeniería

El sistema de control debe recibir automáticamente todos los datos necesarios del sistema eléctrico.

A pesar que cuando Orth realizó su reporte con centrales de mayor tamaño en mente – donde hay cientos de sensores, medidores, actuadores, controladores y los niveles de energía son mayores a los 100 kW – los requerimientos detallados arriba se deben realizar en todo proyecto de generación eléctrica, invariablemente del tipo o tamaño de generación, y son escalables a una planta de microgeneración.

5.4.2. COMPONENTES ESENCIALES DE CONTROL

Un factor importante de sistema de control de cualquier central hidroeléctrica es que deben de ser capaz de soportar los niveles variables de frecuencia y de carga generados. De acuerdo al estudio realizado por Zargari, Hooshmand y Ataei (2012), para poder mejor controlar las frecuencias variables y carga de salida en una central hidroeléctrica un sistema PSO-FSMC (Particle Swarm Optimization - Fuzzy Sliding Mode Controller, Optimizador de Enjambre de Partículas – Modo Fuzzy Deslizante de Controlador) es el sistema de control óptimo para que las plantas hidroeléctricas de menor tamaño puedan regular mejor la respuesta a frecuencias dentro de las plantas. El FSMC es un controlador de estructura variable que realiza la función de regular contra los cambios de carga. El PSO es un algoritmo permite regular las funciones del FSMC para obtener una mejor respuesta de la frecuencia.

Normalmente en plantas hidroeléctricas la frecuencia de carga en el sistema está controlado por el manejo del dump load, como se muestra en la Figura 04.

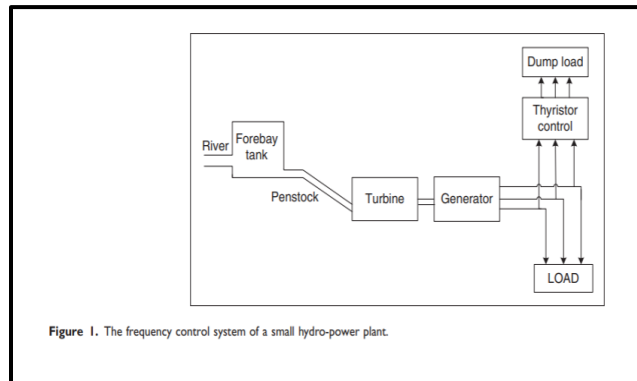


Figura 14. El sistema de control de frecuencia de una planta hidroeléctrica pequeña estándar.

La inclusión de un servomotor que controle el ingreso de agua permite eliminar el *dumb load* del sistema.

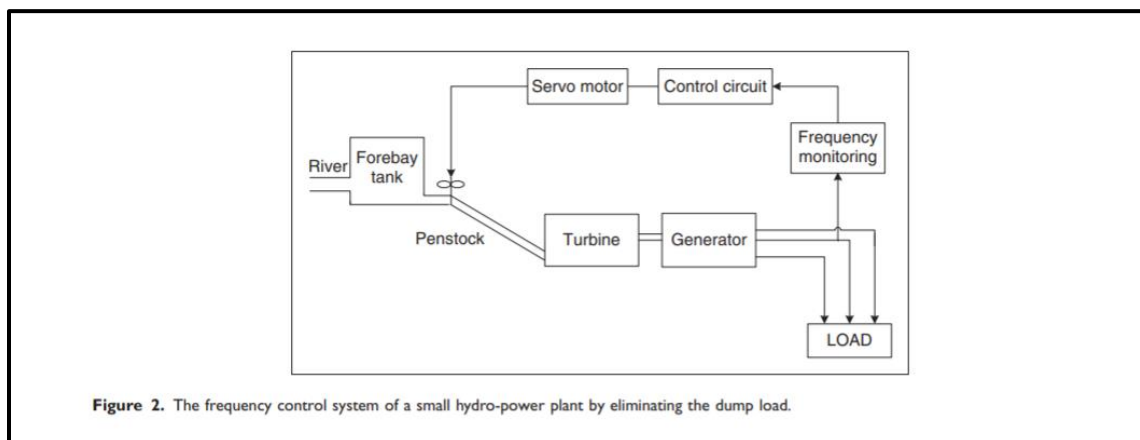


Figura 15. El sistema de control de frecuencia de una planta hidroeléctrica pequeña con servomotor.

5.5. COSTOS OPERACIONALES Y DE MANTENIMIENTO

De acuerdo a YoosefDoost y Lubitz (2020) los costos operacionales y de mantenimiento generales en una TTH son considerablemente menores a los costos de otras turbinas ya que la turbina está diseñada para operar con pocos puntos de desgaste y a operar a velocidades bajas, lo cual reduce los problemas de abrasión y deterioro. Los puntos más comunes de erosión química y física ocurren en los alabes y el canal del tornillo. El mantenimiento regular de una TTH incluye

revisión de los niveles de fluidos y remplazo de grasa en el cojinete de rodamiento superior y en el engranaje. El rodamiento inferior está diseñado para operar sin mantenimiento hasta que sea necesario reemplazarlo.

5.6. MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

En términos de microgeneración y picogeneración no hay un estándar que delimita de que materiales debe ser construido el tornillo, en gran parte porque en menor es el tamaño del tornillo más libertad hay para trabajar con amplia extensión de materiales que no sería posible con otras turbinas. Se aclara que para potencias superiores a microgeneración el material de construcción del tornillo si debe ser de mayor resistencia de esfuerzos.

Debido a que no hay un estándar al cual se hay que adherir es posible experimentar con otro tipo de materiales. Por lo cual es posible utilizar tubos de PVC de grado 80 o Polieteleno de Alta Densidad (HDPE). El PVC, polyvinyl chloride, es un polímero de amplio uso que tiene aplicaciones en distribución de agua, aparatos médicos, construcción, empaquetado de electrónicos, y empaquetado de alimentos. El PVC de grado 80 es más resistente a la corrosión y la presión que otras variantes de tubería. Un tubo de PVC sería extremadamente funcional como el tubo central del tornillo. El dilema radica en el diseño de los alabes debido a que deben tener una curvatura que les permite rodear el tubo central y a la vez tener una inclinación que les permita captar el agua. Por lo cual será necesario solicitar que se fabriquen a la medida en secciones hechas de HDPE que se puedan instalar en el tubo central.

VI. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentará y explicará las conclusiones desarrolladas tras la conclusión de la investigación.

Conclusión 01 – Es posible igualar la potencia de turbinas Pelton utilizando caudales significativamente menores.

Para generar 12.5 [kW] una turbina Pelton requiere 35 [m³/s]. Sin embargo, con una turbina de tornillo es posible generar igual potencia con un caudal de 0.89 [m³/s]. Esto les abre mayor número de sitios posibles en donde realizar el proyecto.

Conclusión 02 – Bajo costo de inversión en construcción y mantenimiento lo convierte en una atractiva alternativa para proyectos de desarrollo en comunidades aisladas.

Los proyectos de desarrollo tienen presupuestos delimitados y limitados por las organizaciones que patrocinan y administran el proyecto. Al requerir inversión considerablemente menor los proyectos de TTH pueden tener una mayor facilidad para ser aprobados.

El bajo costo y simplicidad del mantenimiento permitiría que la comunidad beneficiada realicen ellos mismos, con el entrenamiento correcto, el mantenimiento de la central.

Conclusión 03 – Las TTH son ideales para generar electricidad durante Temporadas Secas. Durante la temporada seca los niveles de los ríos caen significativamente. En algunos casos los ríos se secan. Al poder operar con alta eficiencia en caudales bajos las CMGTTH pueden continuar operando con normalidad todo el año.

Conclusión 04 – El nivel de Potencia en la turbina puede ser regulado regulando el ingreso del agua.

La potencia de la turbina es directamente proporcional al nivel del caudal que está haciendo girar la turbina. Por lo cual regulando la altura de la rejilla que alimenta el tornillo, regulando que tan abierta necesitamos que esté la rejilla podemos regular la velocidad rotacional de la turbina.

Conclusión 05 – Para su generación de corriente se requiere un multiplicador de eje paralelo y generador directo asincrónico.

Conclusión 06 – Para efectos de microgeneración o de menor escala, es posible fabricar una turbina de tonillo hidrodinámico a base de PVC grado 80 o de HDPE.

Para proyectos de mayor generación en los cuales se trabajan con grandes cantidades de volumen de agua es necesario que la TTH sea fabricada con un material metálico que sea resistente que pueda soportar el impacto del agua. Pero para proyectos de microgeneración y picogeneración, que trabajan con caudales inferiores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, no son expuestos al mismo nivel de desgaste y por lo tanto pueden ser diseñados con material más ligero como PVC o laminas metálicas delgadas.

VII. RECOMENDACIONES

A continuación se procederá a detallar las recomendaciones generadas tras la conclusión de la investigación que se estima que serán necesarias para la realización de un proyecto de MCHTTH:

- 1) Se recomienda que durante la etapa de planificación se realice un estudio sobre el caudal del río, si es constante durante el año, y su histórico durante los últimos cinco o diez años. Al igual que es necesario saber si la zona es inundable y su historia de inundación.
- 2) Se recomienda firmemente que se integre a la comunidad(es) beneficiada(s) por la MCHTTH en la construcción de la central y el montaje e instalación de las máquinas. Tal como lo ha demostrado Akon en sus proyectos de electrificación fotovoltaicos en África, los proyectos de desarrollo social en áreas rurales tienen mejor éxito y son sostenibles cuando se integran a las comunidades beneficiadas en montaje, desarrollo y mantenimiento del proyecto. La integración de la comunidad en la socialización y construcción del proyecto le permitirá a la comunidad entender mejor cómo funciona el proyecto y él porque es importante para ellos. Al mismo tiempo se estimularía un sentimiento de orgullo y agradecimiento en la comunidad.

- 3) Debido al estado de contaminación por desechos físicos en los ríos y el arrastre de piedras, se recomienda la instalación de por lo menos una rejilla que sirva como barrera que evite que todo material físico que entre hacia la TTH. Con esto se puede evitar el ingreso de cualquier tipo de material que podría afectar la integridad física o capacidad rotacional del tornillo. Al mismo tiempo se recomienda que dicha rejilla sea revisada periódicamente para verificar estado y realizar limpiezas necesarias. La revisión debe ser diaria durante temporada lluviosa.
- 4) Debido al estado de contaminación por químicos y fertilizantes en los ríos se recomienda que el tornillo y cualquier otra parte metálica que esté en contacto con el agua sean recubiertos con pintura epoxi anticorrosivo que proteja a la TTH del desgaste material causado por la corrosión y oxidación debido al agua contaminada.
- 5) Debido al estado de contaminación por químicos y fertilizantes en los ríos se recomienda que durante la fase de planificación del proyecto se realice un estudio del nivel de pH, de metales pesados y contaminación en el río. Es necesario saber cómo el agua afectará la integridad física del TTH que podría reducir la vida útil del tornillo y incrementar el costo de mantenimiento.
- 6) Se recomienda identificar qué tipo de industria, de haber, hay río arriba y que tipo de conexión tienen ellos con el río. Esta recomendación va de la mano con la recomendación anterior ya que hay empresas y fabricas que aprovechan su cercanía al río para verter sus desperdicios en los ríos.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

LISTADO BIBLIOGRÁFICO

Barbieri, G., Fantuzzi, C., & Borsari, R. (2014). A model-based design methodology for the development of mechatronic systems. *Mechatronics*, 24(7), 833-843.
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.12.004>

Bohstedt, J. (1986). Maxine Berg. *The Age of Manufactures: Industry, Innovation and Work in Britain, 1700-1820*. Totowa, N. J.: Barnes & Nobles Books. 1985. Pp. 378. n.p.
Albion, 18(3), 502-505. <https://doi.org/10.2307/4050002>

Domínguez Suazo, Milton Eduardo. (2012). Microcentrales Hidroeléctricas en Áreas Rurales de Honduras "La experiencia de la FHIA con sistemas desconectados de la red". *UNAH-IHCIT*, 2012, 32.

García, L. M. A. (2014). *DIARIO OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE HONDURAS DECANO DE LA PRENSA HONDUREÑA PARA MEJOR SEGURIDAD DE SUS PUBLICACIONES*. 33, 24.

Guía Metodologica para el Establecimiento de Microcentrales Hidroelectricas en Areas Rurales.pdf. (2012). Recuperado 6 de noviembre de 2020, de http://www.fhia.org.hn/downloads/microhidro_pdfs/guia_microcentrales.pdf

Hamadion, H. (2012). *RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES*.
https://www.academia.edu/12663204/RENEWABLE_ENERGY_TECHNOLOGIES_COST_ANALYSIS_SERIES

History of Hydropower. (2018). Energy.Gov. Recuperado 9 de noviembre de 2020, de <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower>

<https://www.areatecnologia.com>. (2012). *Turbinas Hidraulicas*.

<https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

Investigacion.pdf. (2014). Recuperado 18 de febrero de 2021, de

<https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

Jagyasi, Prem. (2019, marzo 27). *Everything You Should Know About Micro Hydro Power Plants—ProQuest*.

<https://search.proquest.com/docview/2197903458/B8103190AAD54F3CPQ/6?accountid=35325>

Jibrail Ortega_Gabriel Valdivia_Trabajo de Investigacion_Bachiller_2018.pdf. (2018).

Recuperado 18 de febrero de 2021, de

http://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/UTP/2940/1/Jibrail%20Ortega_Gabriel%20Valdivia_Trabajo%20de%20Investigacion_Bachiller_2018.pdf

Ligon, F. K., Dietrich, W. E., & Trush, W. J. (1995). Downstream Ecological Effects of Dams.

BioScience, 45(3), 183-192. <https://doi.org/10.2307/1312557>

Marincic, A. S. (1982). Nikola Tesla and the Wireless Transmission of Energy. *IEEE Power*

Engineering Review, PER-2(10), 58-59.

<https://doi.org/10.1109/MPER.1982.5519923>

Mejia, J. C. A. (2011). *DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL TORNILLO DE ARQUÍMEDES*. 110.

Mench, F., & Oleson, J. P. (1985). Greek and Roman Mechanical Water-Lifting Devices: The History of a Technology. *The Classical World*, 78(3), 221.
<https://doi.org/10.2307/4349735>

Nadia Garcia. (2012). *USAID ProParque—Perfil de Pago: Potenciales Fuentes de Microgeneración Paisaje Productivo Sostenible Caribe* (USAID ProParque: Energía Limpia / Renovables Facilitada).
<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnx1c2FpZHByb3BhcnF1ZXxneDoyYjgxODNmYjMyMTQyY2Zm>

Neda, A. T. L. (2020). *DIARIO OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE HONDURAS DECANO DE LA PRENSA HONDUREÑA PARA MEJOR SEGURIDAD DE SUS PUBLICACIONES*. 35, 6.

Noticias Financieras. (2013, octubre 16). *Con Sistemas Híbridos se Iluminan Zonas Aisladas*.
<https://search.proquest.com/docview/1447571177/2B6F111F7B8B4B80PQ/2?accountid=35325>

Orth, J. (2007). *Future power plant control—Integrating*. 23.

Our Projects | MannPower Hydro. (2021). Recuperado 27 de noviembre de 2020, de
<http://www.mannpower-hydro.co.uk/our-projects/>

Prophet, R. (2015). *An Investigation into the Feasibility of a Micro-hydro Installation for the Guardbridge Energy Centre as Part of a Brownfield Redevelopment*. 102.

Renewable energy: Micro Hydraulic Power Unit (Spiral Type Pico-Hydro Unit "PicoPica10", "PicoPica500"). (2020). United Nations Industrial Development Organization.

Recuperado 27 de noviembre de 2020, de http://www.unido.or.jp/en/technology_db/5276/

Samuel J. Williamso, W. David Lubitz, Arthur A. Williams, Julian D. Booker, & Joseph P. Butchers. (2019). Challenges Facing the Implementation of Pico-Hydropower Technologies. *Journal of Sustainability Research*, 2(1). <https://doi.org/10.20900/jsr20200003>

Serna—Eficiencia energética alternativa de transformaci.pdf. (2019). Recuperado 6 de noviembre de 2020, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76852/15518343.2019.pdf.pdf?sequence=1>

Srh_honduras_2016.pdf. (2016). Recuperado 4 de noviembre de 2020, de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/srh_honduras_2016.pdf

Straalsund, J. L., Harding, S. F., Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2018). Experimental Evaluation of Advanced Archimedes Hydrodynamic Screw Geometries. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(8), 04018052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001479)

Tesis Universidad Tecnica de Ambato—Diseño y Construcción de una mini turbina tipo tornillo de arquimedes.pdf. (2019).

Thousands in rural Afghanistan hook up to hydropower. (2011). UNDP.
<https://www.undp.org/content/undp/en/home/presscenter/articles/2011/03/11/thousands-in-rural-afghanistan-hook-up-to-hydropower-.html>

University, U. S. (2018, septiembre 12). *A New Twist on Archimedes' Screw.* Utah State Today. <https://www.usu.edu/today/story/a-new-twist-on-archimedes-screw>

USAID_Land_Tenure_PROPARQUE_Year_2_Annual_Report.pdf. (2013). Recuperado 20 de febrero de 2021, de https://land-links.org/wp-content/uploads/2018/03/USAID_Land_Tenure_PROPARQUE_Year_2_Annual_Report.pdf

YoosefDoos, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes Screw Turbines: A Sustainable Development Solution for Green and Renewable Energy Generation—A Review of Potential and Design Procedures. *Sustainability*, 12(18), 7352. <http://dx.doi.org/10.3390/su12187352>

Yu, E. S. H., & Hwang, B.-K. (1984). The relationship between energy and GNP. *Energy Economics*, 6(3), 186-190. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(84\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0140-9883(84)90015-X)

