



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**

CARRERA DE ELECTRICIDAD



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



Tema:

IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO GENERADORA HIDROELÉCTRICA CON TURBINA PELTON Y GENERADOR POLOS DE GARRAS PARA APLICACIONES DE BAJA POTENCIA.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero (a) Eléctrico (a)

Autor:

Luis Edison Tapia Licuy

Director:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra, diciembre 2024



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

De acuerdo con lo establecido en el Art. 144 de la Ley de Educación Superior, entrego el presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para su publicación en el Repositorio Digital Institucional, proporcionando la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1501228512		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Tapia Licuy Luis Edison		
DIRECCIÓN:	Tena, Víctor Hugo San Miguel y Víctor Hugo Vasco		
EMAIL:	letapial@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0995921991

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO GENERADORA HIDROELÉCTRICA CON TURBINA PELTON Y GENERADOR POLOS DE GARRA PARA APLICACIONES DE BAJA POTENCIA
AUTOR:	Tapia Licuy Luis Edison
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	04/10/2024
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero(a) Eléctrico(a)
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Gerarado Collaguazo / Ing. Jhonny Barzola MSc.

**2. CONSTANCIAS**

El (los) autor (es) declara (n) que la obra cubierta por esta autorización es completamente original y ha sido desarrollada sin infringir los derechos de autor de terceros. Por lo tanto, el (los) autor (es) es titular (es) de los derechos patrimoniales y asume (n) total responsabilidad sobre su contenido, comprometiéndose a defender a la Universidad en caso de cualquier reclamo de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de diciembre del 2024

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Tapja Licuy Luis Edison

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS****CARRERA DE ELECTRICIDAD****CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de director del señor estudiante Luis Edison Tapia Licuy certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO GENERADORA HIDROELÉCTRICA CON TURBINA PELTON Y GENERADOR POLOS DE GARRA PARA APLICACIONES DE BAJA POTENCIA”

Para la obtención del título de Ingeniero(a) Eléctrico(a), aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....
Ing. Jhonny Javier Barzola Iza

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS****CARRERA DE ELECTRICIDAD****DEDICATORIA**

A mi familia, quienes fueron el soporte y sustento de todos mis logros en la universidad, sobre todo a mi madre, quien lucha cada día insanablemente para que nosotros, sus hijos lleguemos a ser profesionales, con ello espero ser fuente de inspiración a mis hermanas menores quienes estoy seguro de que lograrán sus metas.

Tatiana y Heidy, mis hermanas quienes con sus sonrisas y chiste iluminan mis días, gracias por ese apoyo incondicional.

Finalmente, a Helen, por su apoyo, delicadeza y cariño, gracias por estar siempre en los momentos más delicados, y hacer que todos los esfuerzos alados tuyo valgan la pena, sacrificando mucho tiempo y sustento económico en lo que creemos, serán nuestras fuentes de inspiración.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a los docentes de la Universidad Técnica del Norte, quienes no solo compartieron sus conocimientos, sino también sus experiencias, formando así un pilar fundamental en mi proceso de aprendizaje. Agradezco a cada miembro del personal administrativo y académico que, de manera directa o indirecta, contribuyó al desarrollo de este estudio, proporcionando la información.

A mi director de tesis, cuyo apoyo incondicional, paciencia y confianza en mis capacidades fueron claves para superar los retos de esta investigación. Gracias por guiarme con dedicación, marcando el camino en cada fase del desarrollo de este trabajo, y por ser un ejemplo de profesionalismo y

Mi más sincero agradecimiento también a mi asesor de tesis, quien utilizó un papel esencial en la culminación de este documento. Sus valiosos consejos y orientación no solo me ayudarán a estructurar adecuadamente la investigación, sino que también me brindarán la confianza necesaria para su presentación y defensa. Gracias por estar presente en cada paso de este proceso.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS.....	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	12
RESUMEN	13
CAPÍTULO I	17
INTRODUCCIÓN	17
<i>Tema</i>	17
<i>El problema</i>	17
1.1. Problema de investigación	17
1.1.1. Problemática a investigar.....	17
1.1.2. Elaboración de la pregunta de investigación	18
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivo general	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Alcance y Delimitación	18
1.4. Justificación.....	19
CAPÍTULO II	21
ANÁLISIS DE UNA PICO GENERADORA HIDROELÉCTRICA	21
2.1. <i>Tipos de energía</i>	21
2.1.1. Tipos de energía renovables	21
2.1.2. Tipos de energía no renovables	21
2.2. <i>Generación Hidroeléctrica</i>	22
2.2.1. Tipos de centrales hidroeléctricas.....	22



CARRERA DE ELECTRICIDAD

2.2.2.	Componentes principales de la hidroeléctrica de agua fluyente	23
2.2.3.	Componentes de central de pie de presa o embalse	24
2.2.4.	Componentes de centrales de bombeo	24
2.2.5.	Clasificación de las centrales según su potencia	25
2.3.	<i>Picos centrales hidroeléctricas</i>	26
2.3.1.	Partes de un pico central hidroeléctrica	27
2.3.2.	Generador.....	27
2.3.2.1.	Dispositivo Generador síncrono	28
2.3.2.2.	Dispositivo generador de flujo axial	32
2.3.2.3.	Dispositivo generador de imanes permanentes	33
2.3.2.4.	Generador polos de garra.....	33
2.3.2.5.	Generador asíncrono	34
2.3.3.	Turbina	35
2.3.3.1.	Categorización de turbinas hidráulicas	35
2.3.3.2.	Turbina de acción.....	37
2.3.3.3.	Turbina de reacción	37
2.3.3.4.	Elección de turbina.....	38
2.3.4.	Turbina para el Generador Pelton	40
CAPÍTULO III		43
MATERIALES Y MÉTODOS		43
3.1.	<i>Introducción</i>	43
3.2.	<i>Tipo de investigación</i>	43
3.3.	<i>Métodos de investigación</i>	43
3.4.	<i>Flujograma para la ejecución de una pico generadora hidroeléctrica con Turbina Pelton y generador polos de garra</i>	44
3.5.	<i>Parámetros de construcción</i>	46
3.6.	<i>Dimensionamiento de la Turbina Hidráulica</i>	46
3.7.	<i>Materiales</i>	56
3.7.1.	Diagrama de implementación.....	57
3.7.2.	Cisterna de agua	57
3.7.3.	Motobomba.....	58
3.7.4.	Tuberías.....	59
3.7.4.1.	Tubería de succión	59



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**



CARRERA DE ELECTRICIDAD

3.7.4.2.	Tubería de presión y conducción	60
3.7.5.	Generador Polos de garra	61
3.7.6.	Inversor de Corriente DC/AC.....	62
3.7.7.	Batería VRLA 12 V DC 7.5Ah.....	63
CAPÍTULO IV		65
RESULTADO Y ANÁLISIS.....		65
4.1.	<i>Diseño de turbina Pelton</i>	65
4.1.1.	Potencia eléctrica aproximada normal Pe :	65
4.1.2.	Para la velocidad específica ns	66
4.1.3.	La velocidad absoluta c1 y velocidad tangencial u *	66
4.1.4.	Diámetro del chorro	67
4.1.5.	Dimensiones de Cuchara o Cangilón.....	67
4.1.6.	Representación gráfica de Cangilón.....	68
4.1.7.	Dimensión del rodete	68
4.1.8.	Número de z cucharas y paso t.....	69
4.1.9.	Relación del Diámetro.....	69
4.1.10.	Representación gráfica del Rodete	70
4.1.11.	Representación gráfica de la Turbina Pelton.....	71
4.2.	<i>Representación gráfica del módulo en AutoCAD</i>	71
4.2.1.	Representación gráfica del eje.....	72
4.2.2.	Cubierta superior e inferior	72
4.2.3.	Representación gráfica y cálculo de polea, banda	73
4.2.4.	Representación gráfica del conjunto estructural y montaje.	75
4.2.5.	Construcción y Montaje:.....	77
4.3.	<i>Esquema de conexión para el panel de control para la generación</i>	80
4.4.	<i>Pruebas de funcionamiento</i>	82
4.5.	<i>Conclusiones</i>	84
4.6.	<i>Recomendaciones</i>	84
BIBLIOGRAFÍA.....		86



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Esquema de una central de agua fluyente. [6]	23
Fig. 2 Esquema de central de pie de presa o embalse. [6]	24
Fig. 3 Esquema de central de bombeo. [7].....	25
Fig. 4 Tipos de rotor de las máquinas síncronas. [12].....	28
Fig. 5 Esquema funcionamiento, forma de onda de un generador trifásico. [18].....	32
Fig. 6 Despiece de generador polos de garra. [22].....	34
Fig. 7 Turbina de flujo axial.....	35
Fig. 8 Turbina de flujo radial.....	36
Fig. 9 Turbina de flujo mixta.....	36
Fig. 10 Turbina de flujo tangencial.	36
Fig. 11 Selección de turbina en función altura y caudal de operación. [27]	39
Fig. 12 Esquema de componentes de una turbina Pelton.....	41
Fig. 13 Flujograma de Metodología aplicarse.....	45
Fig. 14 Velocidad específica de turbina hidráulicas. [31]	48
Fig. 15 Dimensionamiento de Cangilón. [31].....	52
Fig. 16 Cisterna AB de 1,100 litros.....	57
Fig. 17 Motobomba de succión.....	59
Fig. 18 Manguera de succión.	60
Fig. 19 Especificaciones de tuberías de presión.....	60
Fig. 20 Generador polos de garra.	62
Fig. 21 Inversor	63
Fig. 22 Batería de GEL	64
Fig. 23 Diseño de Cangilón en AutoCAD.....	68
Fig. 24 Representación gráfica del rodete en AutoCAD.....	70



Fig. 25 Representación gráfica de la Turbina Pelton 18 Cangilones.	71
Fig. 26 Eje de hierro de transmisión de 1 pulgada 3/4.....	72
Fig. 27 Cubierta superior e inferior.	73
Fig. 28 Representación gráfica de banda y poleas.	73
Fig. 29 Representación gráfica de conjunto estructural B.	76
Fig. 30 Representación gráfica de conjunto estructural A	76
Fig. 31 Desarrollo de la estructura.	77
Fig. 32 Acabados del módulo.....	78
Fig. 33 Montaje del módulo y puesta en marcha.	79
Fig. 34 Diagrama de conexión Tablero de generación.....	81
Fig. 35 Puesta en marcha del módulo.	83



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I Potencia de las Centrales Hidroeléctricas	26
TABLA II Valores N_s y N_q para Cada	39
TABLA III Cálculo de potencia de salida.	46
TABLA IV Materiales Empleados	56
TABLA V Especificaciones de motobomba de succión.	58
Tabla VI Especificaciones del generador polos de garra.	61
TABLA VII Especificaciones de Inversor.....	63
TABLA VIII Especificaciones de Batería.	64
TABLA IX Tabla de prueba con carga.	82

**RESUMEN**

La energía hidroeléctrica se destaca por su capacidad para generar electricidad de manera eficiente y sostenible. El crecimiento poblacional y los avances tecnológicos han incrementado la demanda de energía eléctrica, lo que hace indispensable el desarrollo de nuevas fuentes de generación. Las metas que se desean alcanzar en este trabajo de grado es analizar y desarrollar la instalación de una pequeña central hidroeléctrica mediante el uso de una turbina Pelton y un generador de polos de garra, evaluando aspectos técnicos como el diseño, dimensionamiento del sistema, selección de materiales y componentes, e integración de un sistema autónomo (OFF-GRID)

La metodología empleada incluye una revisión bibliográfica exhaustiva que proporciona la base teórica y la información necesaria para el desarrollo de este estudio. Los parámetros de construcción se basan en los datos específicos del lugar donde se implementará el proyecto, utilizados para diseñar el módulo y sus componentes. El dimensionamiento de la turbina se realizó mediante modelos matemáticos que guiaron el diseño de la turbina Pelton. Entre los resultados obtenidos, se destaca el diseño y la instalación del pico generador, equipada con una turbina Pelton de 18 cangilones y un diámetro de 444,5 mm, la cual alcanzó 330 rpm bajo carga en el eje de la turbina. Además, se utilizó un generador de polos de garra de 12 V DC y 85 amperios, que llegó a 1300 rpm, tal como se había estimado en la mediante transmisión poleas, permitiendo así alimentar una carga de 18 vatios. En resumen, la instalación de un pico generador resulta viable para aplicaciones de baja potencia, ya que es capaz de generar energía eléctrica a bajas revoluciones utilizando una motobomba de succión y una tubería de 2 pulgadas, que suministra una presión de 15 psi. Esto permite el movimiento mecánico de una turbina Pelton de 50 kg, lo que, a su vez, facilita la carga de una batería de 12 V.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Palabras Claves

Turbina Pelton, Dimensionamiento de Turbina, Generador de polos de garras, Implementación de turbina Pelton, Sistemas de baja potencia.

**ABSTRAC**

Hydroelectric power stands out for its capacity to generate electricity efficiently and sustainably. Population growth and technological advances have increased the demand for electricity, which makes the development of new generation sources indispensable. The main objective of this degree work is to analyze and develop the installation of a small hydroelectric power plant using a Pelton turbine and a claw pole generator, evaluating technical aspects such as design, system sizing, selection of materials and components, and integration of an autonomous system (OFF-GRID).

The methodology employed includes a comprehensive literature review that provides the theoretical basis and information necessary for the development of this study. The construction parameters are based on the specific data of the site where the project will be implemented, used to design the module and its components. The sizing of the turbine was carried out using mathematical models that guided the design of the Pelton turbine. Among the results obtained, the design and installation of the generator peak, equipped with a Pelton turbine of 18 buckets and a diameter of 444.5 mm, which reached 330 rpm under load on the turbine shaft. In addition, a 12 V DC, 85-amp, claw-pole generator was used, which reached 1300 rpm, as estimated in the pulley drive, thus allowing a load of 18 watts to be fed. In summary, the installation of a pico generator is feasible for low power applications, as it is capable of generating electrical power at low rpm using a suction motor pump and a 2-inch pipe, supplying a pressure of 15 psi. This allows the mechanical movement of a 50 kg Pelton turbine, which in turn facilitates the charging of a 12 V battery.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Key words

Pelton turbine, Turbine sizing, Claw pole generator, Pelton turbine implementation, Low power systems.



CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Tema

Implementación de una pico generador hidroeléctrica con turbina Pelton y generador de polos de garras para la aplicación de baja potencia.

El problema

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Problemática a investigar

En el país, se está observando un crecimiento acelerado en el uso de energías renovables, gracias al potencial hídrico y geográfico que ofrece Ecuador. Las plantas hidroeléctricas son responsables de aproximadamente el 70% de la producción de energía, satisfaciendo así la demanda de la población. Se están proyectando megaproyectos para el futuro que buscan aprovechar el potencial hídrico en diferentes regiones. Es ampliamente reconocido que la generación distribuida trae consigo múltiples beneficios, considerando las condiciones del país en cuanto a sus recursos hídricos. A medida que pasa el tiempo, la demanda de energía sigue aumentando, y la tendencia hacia un mayor uso de la tecnología sugiere la necesidad de desarrollar proyectos de planificación que tengan un alto margen de generación. Por esta razón, es fundamental implementar la generación distribuida en microrredes. En este sistema, el usuario no solo actúa como consumidor, sino también como generador, lo que ayuda a la red de distribución o permite el autoabastecimiento. El generador síncrono de polos de garra, conocido como alternador de vehículos automotrices, se encarga de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Este dispositivo recupera la energía utilizada al arrancar el vehículo y la almacena en la batería de corriente continua (DC). Una de sus características distintivas es el rotor de garras sólidas, que facilita alcanzar las revoluciones óptimas para su funcionamiento y aplicación. Además, este tipo de generador presenta pérdidas mínimas de potencia de excitación, gracias al diseño eficiente de sus anillos rozantes y escobillas. El recurso hídrico puede ser utilizado mediante pico hidroeléctricos, permitiendo almacenar



energía y utilizarla en emergencias o, cuando la demanda lo requiera, inyectar potencia a una microrred.

1.1.2. Elaboración de la pregunta de investigación

¿Qué metodología utilizar para la implementación de un pico generador hidroeléctrica con turbina Pelton y generador polos de garra para la aplicación de baja potencia?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Ejecución de un pico generador hidroeléctrico con turbina Pelton y generador polos de garras de baja potencia como una alternativa para el autoabastecimiento de energía eléctrica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar los antecedentes y fundamentos teóricos de un pico generador hidroeléctrico para el autoabastecimiento.
- Diseñar una pico generadora hidroeléctrico para el autoabastecimiento.
- Implementar un pico generador hidroeléctrica para la aplicación de baja potencia.

1.3. Alcance y Delimitación

El objetivo del proyecto de tesis consiste en implementar una pico generadora hidroeléctrica que utilice una turbina Pelton junto con un generador de polos de garras de 0,746 kW a 12 voltios DC, diseñado para sistemas de baja potencia. Este sistema se enfocará en la sostenibilidad ambiental y en la conceptualización de los parámetros operativos de la turbina Pelton, así como en el rendimiento del generador de polos de garras para la producción de energía eléctrica. La metodología que se aplicará será de tipo documental, enfocándose en la revisión de la bibliografía existente. Se emplearán diodos rectificadores para el sistema de carga de baterías, la turbina Pelton convertirá la energía cinética del caudal de agua en energía mecánica, y mediante el generador de polos de garras (alternador de vehículos automotrices) se transformará en energía eléctrica. Además, se incluirán estructuras y diversos elementos que



CARRERA DE ELECTRICIDAD

proporcionarán soporte a este pico generación hidroeléctricos, los instrumentos de medición (como son: voltímetro DC, amperímetro, barómetro, salida de carga, voltímetro AC) para controlar el rendimiento y potencia a estudiarse. Se realizará el estudio de dimensionamiento de la turbina para alcanzar la potencia del generador. Con ello, para futuras investigaciones este módulo podrá tener una conexión a la microrred del patio de pruebas de la carrera de electricidad por medio de un inversor. La información básica a analizarse se obtendrá con la generación en pleno funcionamiento y comparando con estudios realizados de diseño, así como el dimensionamiento de los materiales, permitiéndonos comparar los datos obtenidos. El caudal de agua se realizará aprovechando la motobomba y cisterna de agua del patio de pruebas de la carrera de electricidad. Esta muestra de estudio será el pilar fundamental para crear un diagnóstico con las distintas formas de trabajo y rendimiento de la máquina. Como es el caso de cargas resistivas de 20 Watts, con ello se pretende alcanzar un histórico del comportamiento, e implementarlo como un módulo didáctico en la carrera de electricidad en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Técnica del Norte.

1.4. Justificación

Esta investigación tiene un enfoque social y ambiental, para con el desarrollo energético sostenible del Ecuador, con la implementación de generación eléctrica para sistemas de baja potencia. Hoy en día el crecimiento de la demanda eléctrica va con el crecimiento demográfico del país y la tendencia del uso frecuente de la tecnología en nuestros hogares. Las microrredes con la integración de pico generadores se ponen en estudio con este proyecto de titulación, con el uso de componentes disponibles en nuestro entorno, es decir, tiene mucha disponibilidad por el recurso hídrico que hay en nuestro país, esto hace que este proyecto sea viable para la propuesta de futuros estudios con este prototipo.

La demanda residencial puede suplirse con las fuentes energéticas renovables, ya sea con sistemas fotovoltaicos, eólicos o hidráulicos. La ventaja de aplicar un pico generador hidroeléctrico es el aprovechamiento del recurso hídrico, en este contexto Ecuador es rico, por lo cual es viable aplicar esta forma de generación eléctrica, con embalse de paso para

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS****CARRERA DE ELECTRICIDAD**

implementar estructuras de soporte en una turbina Pelton y generación de polos de garra. Con ello se incentivaría a los abonados los cuales son beneficiarios al momento de aplicar materiales al alcance para la implementación de este tipo de generación eléctrica renovable, en donde una empresa distribuidora suplir el autoabastecimiento y estabilizar los sistemas eléctricos de potencia, permitiendo el ahorro en pérdidas por transporte en tendidos de transmisión desde las generadoras hasta el consumidor final. Por ello, la importancia de implementar este prototipo para sus estudios correspondientes.



CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE UNA PICO GENERADORA HIDROELÉCTRICA

En este apartado se analizará los parámetros que se toman en cuenta para la implementación de un pico generadora hidroeléctrica, así como los diferentes antecedentes que han hecho que el rendimiento de esta se ve afectada al momento de la selección de los diferentes componentes.

2.1. Tipos de energía

Estos se clasifican en dos tipos, los de energía renovable y los no renovables, dependen directamente de la fuente primaria.

2.1.1. Tipos de energía renovables

Este tipo de fuente de energía estipulan fuentes de energía renovable, las cuales son de algún modo inagotables por su propio origen, estas podrían comprender:

- a) Del aire como al eólica.
- b) De la temperatura interna como la geotérmica.
- c) La fuerza del agua como la hidráulica.
- d) La fuerza de las olas como la oceánica.
- e) La radiación del sol como la solar.

De otro modo, es necesario comprender que no por el hecho de ser renovables no afectan de manera indirecta el ambiente, tienen su forma de contaminación. [1]

2.1.2. Tipos de energía no renovables

Aquella energía de recursos no renovables a los que los seres humanos están más expuestos en su vida diaria son el tizón, el hidrocarburo y el gas natural. El consumo masivo de estos recursos ha causado problemas muy graves al medio ambiente en el que vive la gente. Al mismo tiempo, si no se controla el consumo de estos recursos, se agotarán e impide el desarrollo sostenible. [2]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

2.2. Generación Hidroeléctrica

Estas centrales de hidroelectricidad es una estructura que utiliza la energía potencial del agua, creada por la diferencia de altitud entre dos niveles en un cuerpo de agua, para generar electricidad. Este desnivel, conocido como salto geodésico, atribuye a que el agua se canaliza a través de una tubería de presión que impulsa una turbina. Esta energía mecánica producida por la turbina se transforma en energía potencial eléctrica. En este proceso, el uso de recursos hídricos se maximiza, contribuyendo a la generación de energía renovable y sostenible. [3] [4]

El cauce de un río es fundamental en los sistemas hidroeléctricos, ya que permite que el agua pase por una turbina hidráulica, donde su energía cinética se convierte en energía mecánica. Esta tipo de energía luego se transfiere a un generador eléctrico, que la transforma en electricidad utilizable. Por lo tanto, estas instalaciones están diseñadas para aprovechar el flujo natural del agua y convertirlo eficientemente en energía eléctrica. [5]

2.2.1. Tipos de centrales hidroeléctricas

Cada instalación tiene distintos criterios para clasificarlos, pero entre los más importantes es la altura y como se utiliza el agua. [5]

Para el criterio de desnivel del agua:

- a) Plantas de alta presión. [6]
- b) Plantas de media presión. [6]
- c) Plantas de baja presión. [6]

Por su tipo de utilización de agua se tiene:

- a) Plantas de agua fluyente o centrales de paso continuo. [6]
- b) Plantas de embalse o regulación. [6]
- c) Plantas de bombeo. [6]



2.2.2. Componentes principales de la hidroeléctrica de agua fluyente

Forman parte del funcionamiento e instalación de estas centrales, entre los elementos principales se encuentran en la Fig. 1:

1. Captador de agua o Azud
2. La entrada de tipo presa de agua
3. Ducto para el conducto de desviación
4. Estructura tipo cámara de carga
5. Ducto tipo canalillo forzado de presión.
6. Casa de máquinas
7. Desfogue al cauce normal de agua.

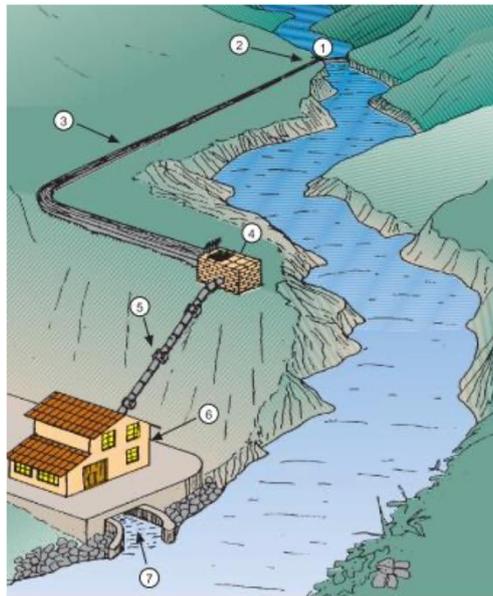


Fig. 1 Esquema de una central de agua fluyente. [6]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

2.2.3. Componentes de central de pie de presa o embalse

Se compone de los siguientes elementos para el almacenamiento del agua o abastecimiento de poblaciones, esto se ilustra en la Fig. 2 que son:

1. Estructura tipo presa
2. Captador tipo toma de agua
3. Ducto de presión tipo tubería forzada
4. Casa de máquinas electromecánicas.
5. Desfogue de agua [7]

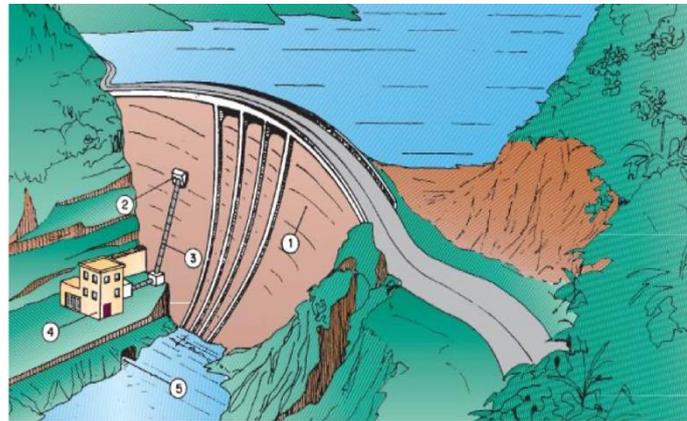


Fig. 2 Esquema de central de pie de presa o embalse. [6]

2.2.4. Componentes de centrales de bombeo

Las instalaciones hidroeléctricas de bombeo, o con el nombre, como sistemas reversibles o Pumped Hydropower Storage (PHS), se distinguen por su habilidad para generar y almacenar energía a través de un sistema hidráulico. (véase la Fig. 3). Este sistema cumple dos funciones principales: la primera es producir electricidad aprovechando el agua almacenada en la parte superior, de forma similar a una central hidroeléctrica convencional. La segunda función de las centrales hidroeléctricas de bombeo es su capacidad de almacenamiento energético, que se activa en momentos de baja demanda eléctrica. Durante estos períodos, el sistema bombea agua desde un embalse con menos altura a uno superior utilizando energía externa. Esto permite que



CARRERA DE ELECTRICIDAD

el agua acumulada en el embalse superior conserve energía potencial. Cuando aumenta la demanda energética, el agua almacenada se libera hacia el embalse inferior, pasando por una turbina que convierte esta energía en electricidad. Este ciclo permite almacenar energía de manera efectiva y aprovecharla en picos de consumo, facilitando una respuesta rápida y económica al sistema energético. [8]

1. Para almacenamiento reservorio superior
2. Adsorción reservorio inferior
3. Sistema de presa o represa
4. Captación de agua o bocatoma
5. Ducto tipo tubería forzada
6. Liberador tipo chimenea de equilibrio
7. Casa se máquinas electromecánicas.

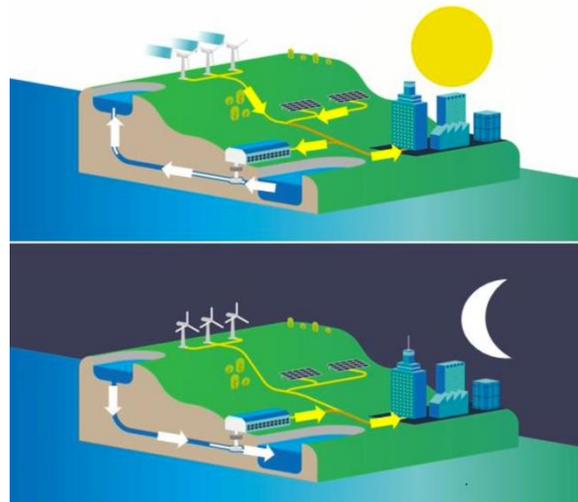


Fig. 3 Esquema de central de bombeo. [7]

2.2.5. Clasificación de las centrales según su potencia

Para [9], las potencias son las que permiten clasificar las centrales hidroeléctricas: Pico centrales, Micro centrales, Minicentrales, Pequeñas Centrales y Macro centrales a modo que se aprecia en la TABLA I



CARRERA DE ELECTRICIDAD

TABLA I Potencia de las Centrales Hidroeléctricas

Fuerza [kW]	Prototipo	Salto en metros		
		Baja	Media	Alta
0,5 - 5	Pico-central	N.A.		
5 - 50	Micro-central	<15	15 – 50	>50
50 - 500	Mini-central	<20	20 – 100	>100
500 - 5000	Peq. central	<25	25 – 130	>130

Nota 1 en esta tabla se describen las diferentes potencias de las centrales hidroeléctricas y su clasificación. [9]

Dada la tabla anterior, podemos distinguir las condiciones necesarias para implementar una pequeña central, para el caso del pico central, no contiene condiciones establecidas.

2.3. Picos centrales hidroeléctricas

Estas instalaciones son similares en construcción a una micro central hidroeléctrica, pero con una capacidad de generación menor. Se utilizan para aprovechar la energía hidráulica de pequeños cuerpos de agua como riachuelos, arroyos y quebradas. Estas centrales, con una capacidad de generación de menos de cinco kilovatios, ofrecen ventajas en cuanto a costos y simplicidad en comparación con los estructura de mayor escala, ya que requieren procedimientos más directos durante las etapas de diseño, planificación e instalación. Funcionan incluso con alturas reducidas y bajos caudales, adaptándose al tipo de pico-turbina adecuado para cada corriente de agua. Para generar electricidad, la altura mínima requerida es de 1,5 metros, con caudales que oscilan entre 35 y 130 litros por segundo; en alturas superiores, entre 3 y 15 metros, el caudal mínimo necesario es de 5 litros por segundo. Estos sistemas son capaces de generar tanto corriente alterna a 220 V como corriente continua 12 y 24 V. [10]



2.3.1. Partes de un pico central hidroeléctrica

- Toma de agua: Se trata de capturar el cauce normal del río y redireccionarlo hacia un canal, permitiendo que llegue el agua a la turbina. [11]
- Represa de carga: tiene como función liberar la energía de la tubería de presión y la turbina, evitando que materiales como arena y rocas, arrastrados por el agua, lleguen a estos componentes clave del sistema generador.[11]
- Tubería de presión: Es un elemento esencial que lleva el fluido desde la presa hasta las turbinas, aprovechando su energía de movimiento para generar electricidad.[11]
- Casa de máquinas: En este espacio se agrupan todos los sistemas esenciales para la producción y el control de la energía eléctrica. [11]
- Canal de desagüe: Su función es redirigir el fluido empleado en las turbinas al río de forma controlada, minimizando el impacto ambiental y protegiendo el ecosistema. [11]
- Generador: Convierte la energía mecánica producida por la turbina en energía eléctrica.[11]
- Turbina: Es el elemento fundamental que transforma la energía cinética del agua en energía mecánica, la cual se utiliza posteriormente para generar electricidad. [11]

2.3.2. Generador

Un generador eléctrico es un aparato diseñado para convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Con ello asegura que este proceso de transformación sea continuo y estable, es fundamental mantener una velocidad constante en el movimiento mecánico. Esto se logra a través de un acoplamiento directo entre la turbina y el generador, lo que permite que ambos dispositivos operen sincronizados a la misma velocidad. De este modo, cualquier cambio en la demanda de energía eléctrica se refleja proporcionalmente en ambos equipos, lo que conlleva un ajuste en la potencia mecánica necesaria para mantener la estabilidad del sistema.

Existen en general dos tipos de generadores:



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- a) Dispositivo Generador o máquina síncrona.
- b) Dispositivo Generador de inducción o asíncrono, máquina asíncrona.

2.3.2.1. Dispositivo Generador síncrono

La primera clasificación se utiliza principalmente en plantas centrales que operan a velocidades reducidas como las hidroeléctricas. En la Fig. 4 se muestra un diagrama de una máquina con rotor de polos salientes, donde se identifican el estator y el rotor como los componentes clave para el funcionamiento correcto de esta máquina. Los devanados son parte de la estructura de rotor y estator, permitiendo la creación de un campo magnético en el rotor que se induce en el estator. En cambio, el rotor de polos lisos se usa en aplicaciones de alta velocidad, ya que evita grandes densidades de masa en los polos, lo cual previene las fuerzas centrífugas excesivas y reduce significativamente el ruido. Para una explicación de su uso son las plantas termoeléctricas. La estructura de generador de polos lisos también incluye un estator, rotor, bobinas de campo, bobinas de armadura y un entrehierro, que es el espacio entre el rotor y la estructura del campo. [12]

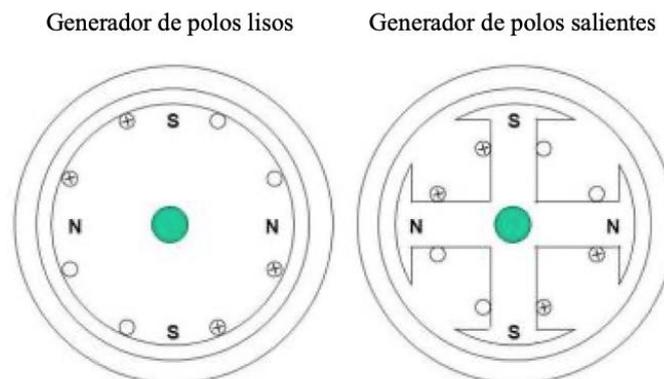


Fig. 4 Tipos de rotor de las máquinas síncronas. [12]

Las características de los rotores de los generadores descritos en [13] pueden clasificarse según su modo de operación, el diseño del conmutador e incluso el número de polos más adecuado en funcionamiento.



2.3.2.1.1. Teorema de ferraris

La velocidad alcanzada a la que la potencia de la componente electromotriz provoca el giro, según el Teorema de Ferraris, se conoce como velocidad de sincronismo. Según las unidades requeridas para dimensionar esta velocidad, se pueden obtener los siguientes resultados: [14]

- La velocidad de sincronismo se expresa en revoluciones por minuto. (RPM):

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

- La velocidad de sincronismo también se puede expresar en radianes por segundo. (rad elec/s):

$$\omega_1 = 2\pi f$$

2.3.2.1.2. Partes fundamentales de un generador síncrono

Hay a disposición varios modelos de máquinas generadoras síncronas, pero en su mayoría incluyen los siguientes componentes:

- Estator: Es la parte fija de la máquina, diseñada para rodear al rotor de manera que este pueda girar en su interior. Está compuesto de un material ferromagnético y cuenta con un conjunto de enrollamientos distribuidos a lo largo de su circunferencia. Los enrollamientos del estator reciben energía de un sistema de tensiones alternadas. Toda la energía eléctrica generada circula a través del estator, donde la tensión de la corriente eléctrica es considerablemente alta en comparación con el campo magnético, que tiene como única función crear un campo magnético para "excitar" la máquina, permitiendo así la inducción de voltajes en los terminales de los enrollamientos del estator. [15]

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- Rotor: Es la parte de la máquina eléctrica responsable del movimiento rotatorio. Está fabricado con un material ferromagnético y cuenta con un enrollamiento denominado "enrollamiento de campo", cuyo objetivo es generar un campo magnético constante que interactúa con el flujo magnético producido por las bobinas en el estator del generador. El inducido de este magnetismo se genera la inyectar corriente en las bobinas esmaltadas que enrollan una armadura metálica. El voltaje aplicado al enrollamiento es constante, y la corriente que circula por él es mucho menor que la del estator. Por consiguiente, el rotor es capaz de disponer de más enrollamiento de bobinas, claro, siempre y cuando estas sean de manera par, tomado en cuenta que tienen que conectarse en serie para disponer de polos el electroimán. [15]
- Técnica de refrigeración: Al igual que cualquier máquina eléctrica, un generador produce calor como subproducto durante su operación. Este calor es consecuencia del efecto Joule en los devanados, así como de la fricción y otros factores.
- Auto-regulador de tensión (AVR): El regulador automático de voltaje permite la excitación al rotor, es decir, es la encargada de que se alimente de manera constante y necesario su campo magnético. Esto se consigue excitándolo con corriente continua. Dependiendo de la zona de 50 a 60 hz, la corriente debe tener esa frecuencia constante, por lo que el rotor debe girar a una velocidad constante, sin importar la carga que esté produciendo (medida en MW). Debido a que las demandas de carga (consumo de energía) son variables, la generación de MW también lo es, pero se mantiene constante la frecuencia y la tensión. Sin un regulador automático de voltaje (AVR), este equilibrio no se lograría. [16]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- Regulador automático de velocidad (RAS): Es crucial aclarar que estos equipos, no deben confundirse con los reguladores de tensión de los alternadores automotrices. Aunque ambos trabajan en conjunto, sus funciones son claramente distintas. Se encarga de equilibrar la velocidad de sincronismo y la carga demandada, generando una protección al generador de velocidades excesivas que podrían producirse, o también conocidas como embalamiento del generador, ya sea por la fuente de energía mecánica o por la desconexión abrupta de la carga.[16]
- Excitatriz: La excitatriz es un dispositivo encargado de proveer campo al momento de empezar a generar energía, así como proveer de manera continua la corriente al campo del rotor, esto hace que induzca una corriente trifásica por los ángulos de desfase en el estator, teniendo voltajes trifásicos de salida. Esta excitatriz consta de una principal y otra piloto, donde retroalimentan al rotor por alimentación continua, rectificando la corriente a DC, tomando en cuenta que la excitatriz piloto contiene otro generador síncrono de baja potencia para retroalimentar a la principal, esto mediante imanes permanentes. [17]

2.3.2.1.3. Principio de funcionamiento

Debido a su diseño, principios de funcionamiento y características (ver Fig. 5), su uso más frecuente es como generador. Su uso como motor depende de la necesidad de mantener una velocidad constante o, en el caso de máquinas de gran tamaño, de la facilidad para ajustar el factor de potencia. Según la construcción del rotor, estas máquinas síncronas se dividen en dos clasificaciones: de rotor liso o cilíndrico, y de polos salientes. Las máquinas con rotor liso, que generalmente tienen un número limitado de polos (2 o 4), operan a altas velocidades, como los generadores de turbinas de vapor o turbogeneradores empleados en plantas térmicas y otras instalaciones similares. [18]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

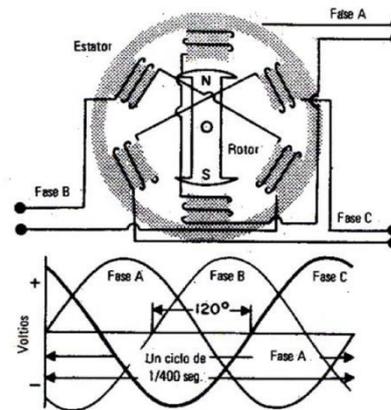


Fig. 5 Esquema funcionamiento, forma de onda de un generador trifásico. [18]

Según [19], el giro del rotor con respecto al estator en un generador genera el desfase de 120 grados entre fases, generando voltajes trifásicos, todo por la alteración del flujo de los campos magnéticos.

2.3.2.2. Dispositivo generador de flujo axial

Esta máquina síncrona con flujos magnéticos de manera axial mantiene imanes permanentes en su estructura, están conformados en la parte frontal como en la posterior con un devanado central donde ambos discos se encuentran de manera estática. Este dispositivo se maneja similar a cualquier generador síncrono estándar. Cada disco de imanes provoca un par de torsión a la velocidad angular, produciendo flujos axiales de movimientos. Por consiguiente, cada espira sinusoidal, la frecuencia de esta es proporcional a su numero de polos. [20]

Esta máquina sigue la Ley de Faraday, lo que genera la inducción de una tensión alterna sinusoidal en cada bobina. El flujo generado depende exclusivamente de la magnetización de los imanes elegidos y a su vez del rpm de rotación proporcionada por los álabes. [20]

Uno de los aspectos más destacados de esta máquina es que, al emplear imanes permanentes, se suprimen ciertos componentes como la corriente inicial de excitación y el interconectado móvil (sin escobillas), lo que mejora la eficiencia del aparato. Además, admite el contacto



CARRERA DE ELECTRICIDAD

directo entre la turbina y el generador debido a su elevado número de polos, lo que reduce los problemas de vibración, lubricación y ruido típicos de este tipo de conexión. Por otro lado, los discos de imanes permanentes actúan como un sistema de refrigeración con ventiladores, proporcionando una refrigeración continua a la máquina y ayudando a reducir su peso en comparación con un generador síncrono convencional. [20]

2.3.2.3. Dispositivo generador de imanes permanentes

Según [21], los imanes permanentes son elementos capaces de magnetizar y mantener el flujo de manera constante sin ser alterados por temperatura o otros flujos magnéticos. Su producción es de manera natural o mineral en la tierra como es el caso de:

- a) Alnico
- b) Ferrita
- c) Neodimio
- d) Cobalto

Tiene como esencia la característica de la curva de histéresis, que involucra el comportamiento de la magnetización y la inducción magnética al introducir un campo en su espacio. La característica de los imanes permanentes es compactar grandes cantidades de energía magnética en un volumen de espacio reducido, generando la imantación. [21]

2.3.2.4. Generador polos de garra

Esta máquina tiene la peculiaridad de que sus polos salientes son robustos y como su nombre lo dice sobre salen de su cuerpo del rotor. Dentro la característica distintiva se encuentra el cuerpo del rotor en forma de garras triangulares que se alternan uno al otro. Como toda máquina rotativa eléctrica tiene los devanados de campo para generar el fenómeno de inducción y orientar de forma transversal el giro.

El rotor está conformado por discos simétricos, donde el contorno muestra una estructura metálica triangular de manera axial, todo esto alineado dando la característica de una garra. Cada garra por decirlo así tiene como orientación el norte y el sur. También tiene como



CARRERA DE ELECTRICIDAD

característica única el tener una sola bobina axial enrollada en el eje, teniendo dos anillos rozantes que conmuta cada bobina. [22]

Entre sus principales características se destacan su robustez y compacidad. Por lo general, el circuito consta de un puente rectificador de onda completa trifásica, lo cual es esencial para su funcionamiento adecuado en corriente continua en automóviles, como se mencionó anteriormente. En la siguiente Fig. 6 se muestran en detalle sus componentes. [22]

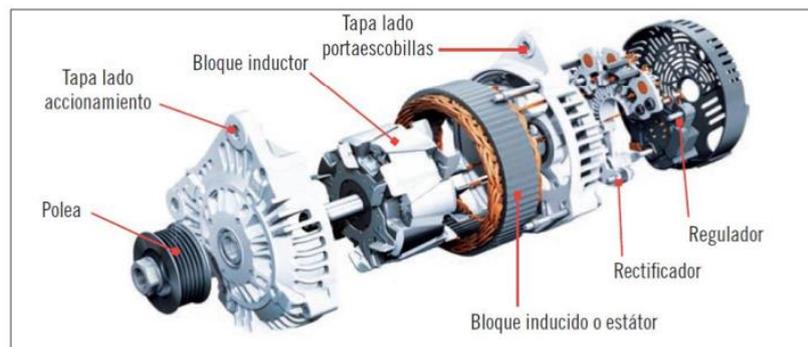


Fig. 6 Despiece de generador polos de garra. [22]

En la [23], generan el despiece para mayor entendimiento del generador.

2.3.2.5. Generador asíncrono

La máquina de inducción tiene como característica distinta a la de corriente continua y las máquinas síncronas en que no requiere alimentación directa de energía al rotor mediante contacto físico, sino que la energía se transfiere por inducción electromagnética. Esto le otorga una gran eficiencia y la hace adecuada para una amplia variedad de aplicaciones. Su uso principal es como motor, aunque también puede operar como generador. En este caso, para que la máquina funcione como generador, su velocidad mecánica debe superar la velocidad síncrona, lo que genera un deslizamiento negativo. Con los parámetros dados, la tensión en cada bobina del rotor por el flujo axial magnético en el entrehierro, que gira de manera síncrona, tienen una frecuencia correspondiente al deslizamiento. Cuando el circuito del rotor está cerrado, las corrientes inducidas en él permiten la generación de energía eléctrica. [24]



2.3.3. Turbina

Es aquella que transforma la energía de un fluido a energía potencial mecánica. Se clasifica en dos tipos: motrices (turbinas), que aprovechan la energía del fluido para generar movimiento, y generatrices (bombas), que transfieren energía al fluido para impulsarlo. La conversión de energía se basa en modificar la energía total del flujo que pasa a través de la máquina. En el análisis de turbomáquinas hidráulicas, los efectos térmicos generalmente no se consideran, aunque en algunos casos se aplican principios termodinámicos específicos. El estudio se realiza bajo condiciones de operación constante, con una rotación estable y un caudal fijo. La energía se intercambia entre el fluido y un mecanismo rotatorio permitiendo el giro dentro de su simetría, compuesto por una o varios rodetes con álabes o palas que dirigen el flujo de agua a través de la máquina, facilitando la conversión de energía. [25]

2.3.3.1. Categorización de turbinas hidráulicas

2.3.3.1.1. Según su función y desempeño

- a) Turbo máquinas motrices
- b) Turbo máquinas generatrices
- c) Turbo máquinas reversibles
- d) Conjunto de transmisión o ensambladura

2.3.3.1.2. Según el ingreso de agua

- a) Axiales. Ingresan el agua en la misma dirección al eje.

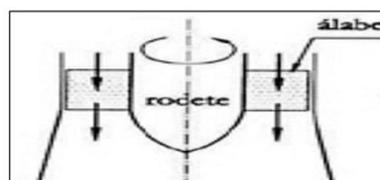


Fig. 7 Turbina de flujo axial.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- b) Radiales. El agua fluye de manera perpendicular al eje en un sistema de movimiento radial. Si el agua se mueve desde el centro hacia la parte externa del sistema, se clasifica como flujo centrífugo. En cambio, si el agua se mueve desde el exterior hacia el interior, se denomina flujo centrípeto. [26]

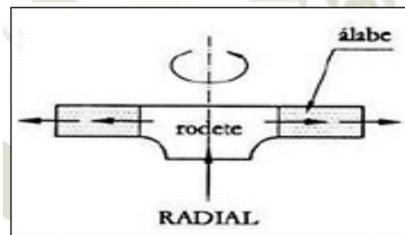


Fig. 8 Turbina de flujo radial.

- c) Mixtas. Son turbinas que combinan características tanto de flujo axial como radial. [26]

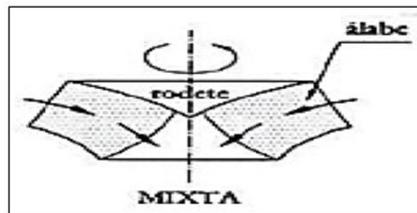


Fig. 9 Turbina de flujo mixta.

- d) Tangenciales. El agua entra tangencial contra las palas. [26]

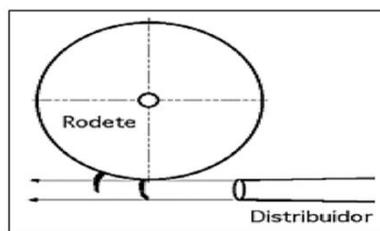


Fig. 10 Turbina de flujo tangencial.



2.3.3.1.3. Según el grado de fuerza

- a) Turbina de acción o impulsión
- b) Turbina de reacción o sobrepresión

2.3.3.2. Turbina de acción

Este tipo de turbinas mantiene la presión constante tanto desde el inicio hasta la llegada del rodete. Esto se logra proyectando chorros de agua a alta velocidad sobre las palas del rodete, lo cual se realiza a través de inyectores que dirigen el flujo de manera precisa hacia los álabes. [27]

Entre las turbinas de acción de mayor relevancia se encuentran:

- Generador Pelton
- Generador Turgo
- Generador Michell banki

2.3.3.3. Turbina de reacción

En estas turbinas, la presión del fluido disminuye desde la entrada hasta la salida del rodete. Esto sucede porque el agua aplica su presión directamente sobre los álabes del rodete, y a medida que el fluido avanza a través de la carcasa, esta presión disminuye de manera progresiva. [27]

Entre las turbinas que mayor características manejan en reacción son:

- Generador Francis
- Generador Kaplan
- Generador Bulbo

Dentro de los siguientes apartados nos enfocaremos en las Turbinas de Acción y en esencia la turbina Pelton la cual es motivo de estudio.



2.3.3.4. Elección de turbina

Según [28], la elección del tipo de turbina a utilizar en una Central Hidroeléctrica depende de varios factores. Se considera principalmente el número específico de revoluciones (N_s), además el coeficiente de caudal (N_q), o bien se emplean nomogramas desarrollados a partir del rendimiento de las diferentes turbinas bajo distintas condiciones peculiares de salto geodésico y caudal de agua, lo que facilita la estandarización de la selección en función de las características operativas, de este modo se aprecia en la TABLA II:



CARRERA DE ELECTRICIDAD

TABLA II Valores N_s y N_q para Cada

Tipo de Generador Hidráulico.

N_s	Tipo de generador hidráulica	N_q
$2 < N_s < 30$	Pelton de una boquilla	$0,6 < N_q < 9$
$30 < N_s < 60$	Pelton de diversas boquillas	$9 < N_q < 18$
$60 < N_s < 200$	Francis lenta	$18 < N_q < 60$
$N_s = 200$	Francis normal	$N_q = 60$
$200 < N_s < 450$	Francis rápida	$60 < N_q < 140$
$450 < N_s < 500$	Francis de varios rodetes, o hélices	$140 < N_q < 152$
$500 < N_s < 135$	Hélice	$152 < N_q < 400$

Nota 2 En la presente tabla se describe el valor determinado de revoluciones, así como el valor específico de caudal para clasificar a las turbinas. [28]

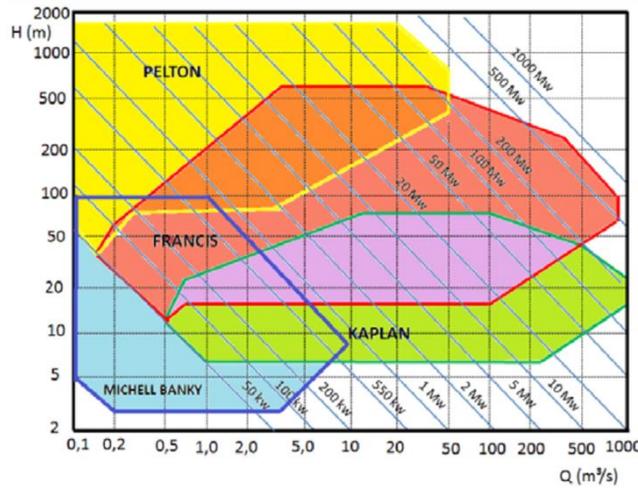


Fig. 11 Selección de turbina en función altura y caudal de operación. [27]

En [29], muestra de forma gráfica segmentada de manera logarítmica las diferentes franjas a las cuales cada turbina puede alcanzar dependiendo de la H altura y el Q caudal.



2.3.4. Turbina para el Generador Pelton

Esta rueda Pelton es una turbomáquina hidráulica diseñada para convertir la energía cinética del agua en electricidad, siendo especialmente adecuada para instalaciones con caídas de agua de altura media a alta. Fue patentada en 1880 por Lester A. Pelton (1829-1908) en California, y es particularmente eficiente para aprovechar la energía de fluidos a alta presión mediante chorros de agua que impactan sobre los álabes del rotor, generando movimiento mecánico que luego se convierte en electricidad. [30]

Tiene la característica que identifica a una turbina de acción, con flujo tangencial y generalmente montada sobre un eje horizontal. Está compuesta por uno o más puntos de entrada de agua hacia el rodete. Los álabes, distribuidos en la periferia del rodete, tienen forma de cuchara, lo que permite que el agua, al impactar sobre ellos, genere la fuerza necesaria para hacer girar la turbina mediante el impulso del chorro de agua. [30]

A continuación, se podrá ilustrar en la Fig. 12 sus principales partes:

Distribuidor: Este componente está conformado por diferentes sistemas que permiten la inyección del agua. De esta manera, permiten el ingreso y la forma que tomará esta agua al momento de golpear los álabes de la turbina. Así, se controla el caudal que requiere el rotor. [30]

Tobera: Se trata de una boquilla con un orificio circular, ubicada al final de la cámara de distribución, que alberga la aguja o inyector. Esta estructura dirige el surtidor de agua de manera tangencial hacia el perímetro del rotor, formando un ángulo de 90° con los radios del rotor en su prolongación. [30]

Rodete: Es el componente clave donde se convierte la energía hidráulica del agua en energía potencial mecánica, de manera general dispone de los siguientes elementos:

- **Rodete motriz:** Este rodete con periferia circular forma parte esencial de los cangilones. Su característica principal es ser un rueda firmemente mecanizada. [30]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- **Cangilones:** También llamados álabes, cucharones o palas, están estructurados para recibir el impacto directo del chorro de agua. Su forma se asemeja a la de dos cucharas opuestas, de manera que el borde interno afilado que divide cada cangilón en dos partes simétricas. [30]
- **Carcasas:** Es el chasis que protege que permite que el fluido salga. Esto genera corrosión en los elementos metálicos que no están dispuestos para el contacto directo con el agua. [30]
- **Cámara de descarga:** De manera general, el espacio común que permite que el agua permanezca esporádicamente para luego ser expulsada y aprovechada para diferentes formas de generar energía, o a su vez ser redirigida a su cauce natural. [30]

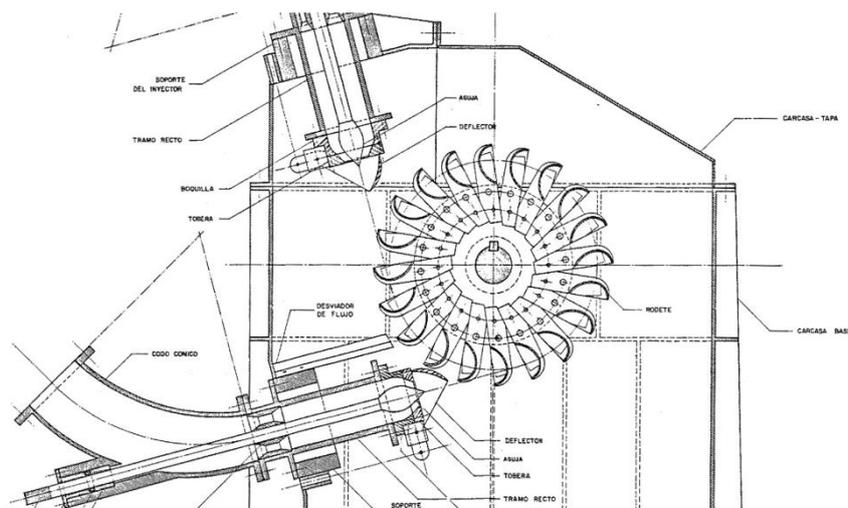


Fig. 12 Esquema de componentes de una turbina Pelton.

Con esta investigación bibliográfica hemos detallado aquellas componentes que hacen a un pico generador hidroeléctrica funcionar de manera óptima, así como detalladamente la selección de la turbina hidráulica para con su caudal y altura pertinente. Para el siguiente capítulo se detallarán los materiales y métodos para la implementación de la turbina. La turbina



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Pelton junto con el generador de polos de garra se encuentran en el espacio posterior para las pruebas de la carrera de electricidad. Con esto, finaliza el capítulo II del presente documento.

**CAPÍTULO III****MATERIALES Y MÉTODOS****3.1. Introducción**

El diseño de la pico generadora hidroeléctrica con turbina Pelton y generador polos de garra, se tomó en cuenta la revisión bibliográfica del capítulo II, donde se describen los parámetros para dimensionar una turbina, así como los elementos a tomar en cuenta para la selección de la misma. Las etapas de la investigación realizada se llevaron a cabo por medio del análisis de aquellos antecedentes que permiten construir una pico generadora hidroeléctrica.

3.2. Tipo de investigación

El enfoque de investigación utilizado en este trabajo de integración curricular es de tipo aplicado, con un enfoque experimental, ya que busca resolver problemas específicos de manera práctica a través de la aplicación de conocimientos teóricos. El sistema de generación pico hidroeléctrico en un entorno controlado contempla una investigación aplicada adecuada porque busca resolver un problema concreto y tiene un objetivo práctico, así como utilitario. El enfoque experimental, por otro lado, implica el manejo de ciertas variables dentro de un espacio controlado, permitiéndonos ver a detalle las relaciones causa y efecto. En este caso, se investiga cómo las diferentes configuraciones del sistema, los caudales de agua y las cargas eléctricas afectan el rendimiento y la eficiencia de la turbina y el generador, buscando optimizar su funcionamiento. Con esta investigación se permitió realizar pruebas controladas y obtener datos precisos sobre el desempeño del sistema.

3.3. Métodos de investigación

Los métodos empleados para el desarrollo de la investigación fueron: lógico deductivo, sintético analítico y bibliográfico. Donde se consultaron diferentes fuentes bibliográficas como revistas científicas, repositorios en línea, artículos científicos, libros para el análisis minucioso a detalle de cada elemento que hace parte de esta investigación y que tenga relación teórica práctica con el conocimiento adquirido en el proceso de aprendizaje. Teniendo en cuenta esto,



se procedió a ilustrar gráficamente las etapas que hacen parte de la metodología a llevarse a cabo en el presente capítulo. [31]

3.4. Flujograma para la ejecución de una pico generadora hidroeléctrica con Turbina Pelton y generador polos de garra

Para un correcto entendimiento de los procesos a seguir se presenta una gráfica Fig. 13 que describe detalladamente cada etapa a seguir previo a la investigación realizada en el capítulo II. El correcto estudio nos permite tener claro los parámetros aplicados para la correcta selección de materiales y componentes que han permitido la implementación. El presente flujograma detalla el proceso de implementación desde la revisión bibliográfica hasta las conclusiones del proyecto y la presentación de los resultados, cada etapa se presenta de forma secuencial para proporcionar una guía clara y estructurada para la realización exitosa del proyecto.

A través de este proyecto, se espera no solo abordar la necesidad del conocimiento teórico práctico en materia de generación de energía hidroeléctrica, sino también fomentar el interés y la comprensión en las energías renovables y la sostenibilidad energética. Este flujograma servirá como herramienta para guiar y facilitar la implementación eficiente y efectiva de la pico generadora hidroeléctrica, brindando una valiosa contribución al desarrollo académico y tecnológico en el campo de la electricidad.

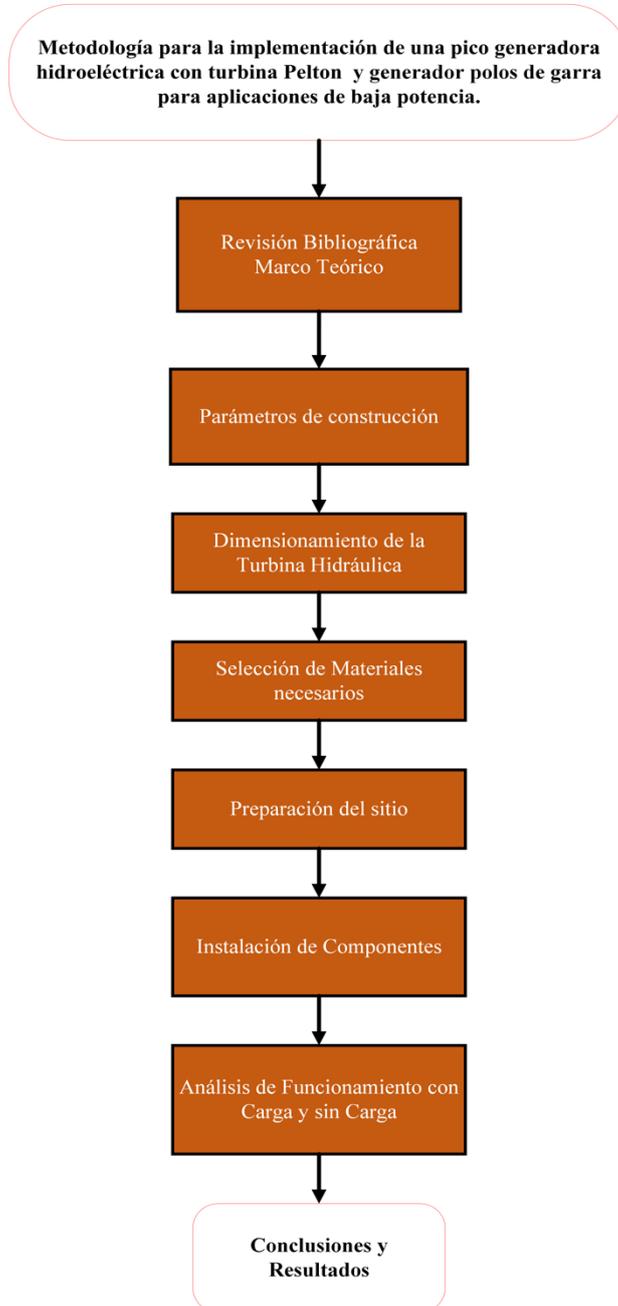


Fig. 13 Flujoograma de Metodología aplicarse.



3.5. Parámetros de construcción

En [32], se toman en cuenta los parámetros de salto y caudal que proporciona el área a implementarse, en este caso se detalla en el apartado 3.7.3 Motobomba de succión, la cual mediante su ficha técnica especifica el desempeño en conjunto al emulador de caudal en sitio, para lo cual el autor detalla por medio de la siguiente tabla la eficiencia del generador independientemente de la turbina a utilizarse.

TABLA III Cálculo de potencia de salida.

Salto	Caudal de agua $\left[\frac{l}{s}\right]$	Gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Eficiencia [%]	Potencia de salida [W]
0,704	22	9,8	50	75,89
3,52	27	9,8	50	465,696
7,04	32	9,8	50	1103,872
10,65	37	9,8	50	1930,85
14,08	42	9,8	50	2897,664
17,6	47	9,8	50	4953,28
21,12	52	9,8	50	5174,4

Nota 3 en la presente tabla se detalla un estudio anterior del sistema de bombeo que dispone la carrera de electricidad. [32]

3.6. Dimensionamiento de la Turbina Hidráulica

Dado los parámetros encontrados para la construcción del módulo a implementarse con la turbina Pelton, se presentará a continuación el proceso de dimensionamiento de la turbina, para ello se detallan las ecuaciones utilizadas.

Potencia eléctrica aproximada normal P_e :

En [33], permite dimensionar el rendimiento de la turbina a partir de los parámetros de caudal y la altura, siendo un estimado integral.



$$P_e = \eta * \gamma * Q * H = [kW]$$

Ecuación (1)

Siendo:

 η = Coeficiente de Rendimiento γ = Peso específico del agua $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ Q = Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ H = Altura $[m]$ **Para la velocidad específica η_s**

Este parámetro nos permite aproximar la velocidad específica que pueden estar alrededor de 75 rpm (para alternadores con 40 parias de polos) y 75 – 1000 rpm (alternadores con 4 – 3 parias de polos). Siendo $n_s = 20 (n [rpm], P_e [CV], H [m])$ un valor que no es de sincronismo, donde el autor recomienda utilizarlo como coeficiente base, se cambiará el valor si el tamaño del alternador por coste aconseje a disminuirlo. Con ello se despejó la Ecuación (2) para obtener n . [33]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

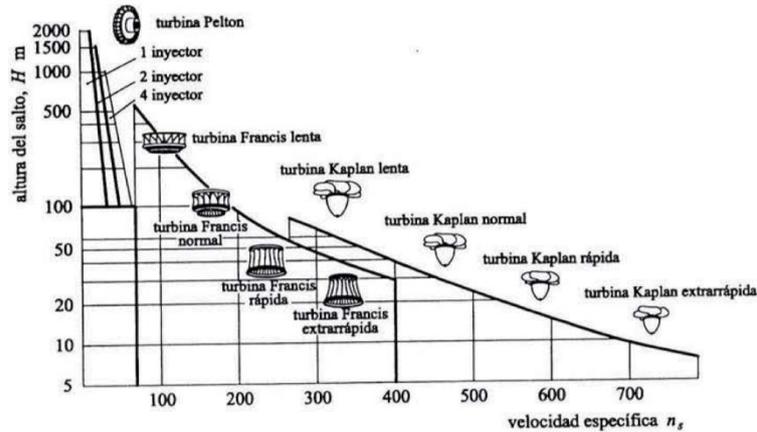


Fig. 14 Velocidad específica de turbinas hidráulicas. [31]

Para una fuerza P_e y un número de sublevaciones n , los impulsos de alta presión nos trasladan a velocidades específicas n_s bajas; aunque aumentemos n (menor número de polos en el alternador), n_s puede seguir bajando, dependiendo del valor de H . Sin embargo, los saltos de baja presión nos transportan a velocidades concretas n_s altas; aunque disminuyamos n , n_s puede seguir siendo alta dependiendo del valor de H (véase la Fig. 14).

$$n_s = \frac{n * P_e^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

Ecuación (2)

Donde:

n = Número de revoluciones

P_e = Potencia eléctrica aproximada [CV]

H = Altura [m]



Para tener a continuación el despeje de n para obtener los rpm de la turbina:

$$20 \approx \frac{n * P_e^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

$$n \approx \frac{20 * H^{\frac{5}{4}}}{P_e^{\frac{1}{2}}}$$

La velocidad absoluta c_1

Siendo parte del triángulo de velocidades, en la entrada, la velocidad absoluta c_1 (véase la Ecuación (3)) de ingreso en el rodete es la velocidad V de salida de agua del inyector, el adimensional C_1 suele llamarse al factor de velocidad absoluta de ingreso. Su valor es, $C_1 = 0,97 \div 0,99$; siendo $C_1 = 0,98$ el valor que en inicio podría aplicar a falta de información real. [33]

$$c_1 = C_1 \sqrt{(2 * \gamma * H)}$$

Ecuación (3)

Donde se detallan:

C_1 = Factor de velocidad absoluta de entrada

γ = Peso específico del agua $\left[\frac{m}{s^2} \right]$



$H =$ Altura [m]

Velocidad tangencial

En [33], se muestra el haber considerado las pérdidas en el inyector y el rodete, el rendimiento hidráulico es anulado por lo que la posición de diseño residiría en torno a Ecuación (4):

$$u^* \approx 0,46 * c_1 \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

$$c_1 = \text{Velocidad absoluta} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Diámetro del chorro

En [33], por medio de esta Ecuación (5) se puede encontrar el diámetro del chorro en la tobera, el resultado se dará en metros:

$$Q = \frac{\pi * d^2}{4} * c_1 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

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

$$d = \text{Diámetro de chorro} [m]$$

$$c_1 = \text{Velocidad absoluta} \left[\frac{m}{s} \right]$$



Ecuación despejada para el diámetro del chorro:

$$d = \sqrt{\frac{Q * 4}{c_1 * \pi}}$$

Ecuación (6)

Dimensiones de Cuchara o Cangilón

Las dimensiones de los álabes, en este caso de la turbina Pelton (Cangilón) se puede obtener por medio de estas ecuaciones empíricas, en base a la experiencia del autor. [33]

$$L = 2,10 * d$$

$$B = 2,50 * d$$

$$T = 0,85 * d$$

$$t = 2 * d$$

Ecuación (7)

Donde:

L = Largo lateral [cm]

B = Base ancho [cm]

T = Profundidad de cuchara [cm]

t = Espacio entre dos cangilones consecutivos [cm]



CARRERA DE ELECTRICIDAD

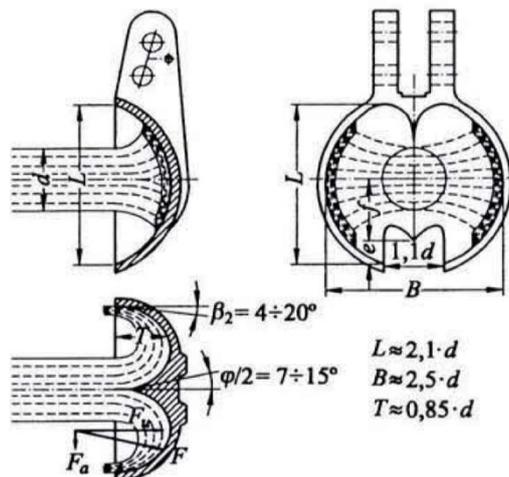


Fig. 15 Dimensionamiento de Cangilón. [31]

Dimensión del rodete

En [33], se muestra la rueda donde reposan los álabes o cangilones, la dimensión será en metros. Eso se especifica en la siguiente Ecuación (8):

$$D = \frac{60 * u^*}{\pi * \eta}$$

Ecuación (8)

u^* = Velocidad tangencial $\left[\frac{m}{s} \right]$

n = Número de revoluciones $[rpm]$

Numero de z cangilones



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Por medio de la Ecuación (9), se logró encontrar el número aproximado de cangilones necesarios para cubrir el rodete. [33]

$$z = \frac{\pi * D [m]}{t [m]}$$

Ecuación (9)

D = Diámetro de Rodete [m]

t = Espacio entre dos cangilones consecutivos [m]

Paso continuo t

Para encontrar el espacio entre dos cangilones, se utiliza la Ecuación (10), este valor tiene como resultado en metros: [33]

$$t = \frac{\pi * D [m]}{z}$$

Ecuación (10)

D = Diámetro del Rodete [m]

z = Número de cangilones

Relación del Diámetro

En [33], se muestra la relación de diámetro entre el rodete y el choro (véase la Ecuación (11)) permiten comprender las dimensiones idóneas de la turbina, es decir, si el valor es muy grande como resultado en milímetros saldrán muchas cucharas y pequeñas (n_s baja), y si es



CARRERA DE ELECTRICIDAD

pequeña (n_s alta). El valor $\frac{D}{d} \approx 12$, para el que $n_s \approx 20$ es el que proporciona mejor rendimiento como ejemplo:

$$\frac{D}{d} = [mm]$$

Ecuación (11)

D = Diámetro de Rodete

d = Diámetro de chorro

Relación de transmisión

En la [34], se muestra la Ecuación (12), donde se detalla la relación de transmisión para la polea motriz con la polea conducida.

$$i = \frac{\emptyset_1}{\emptyset_2}$$

Ecuación (12)

Donde:

\emptyset_1 = Diámetro de la polea propulsora

\emptyset_2 = Diámetro de la polea que recibe la transmisión.

Velocidad angular de salida RPM

En la [34], tenemos la Ecuación (13) que detalla la velocidad de salida teórica en la polea conducida.



$$\omega_2 = \frac{\omega_1 * \phi_1}{\phi_2} = [rpm]$$

Ecuación (13)

Donde:

ω_1 = RPM de la polea motriz

ω_2 = RPM de la polea conducida

ϕ_1 = Diámetro de la polea motriz

ϕ_2 = Diámetro de la polea conducida

Longitud de la banda

De la misma manera tenemos en [34], la Ecuación (14) donde se detalla el cálculo para la banda, tomando como referencia el centro de cada polea y sus diámetros.

$$L = \frac{\pi}{2}(\phi_1 + \phi_2) + 2A + \frac{(\phi_1 - \phi_2)^2}{4A} = [cm]$$

Ecuación (14)

Donde:

A = Distancia entre centros de cada polea



3.7. Materiales

Este proyecto implementa diferentes componentes que han sido seleccionados tanto por la disponibilidad en el laboratorio, así como a lo estudiado anteriormente como es el cumplimiento de los parámetros y los diferentes dispositivos de control y regulación del caudal.

Para el desarrollo de esta implementación es necesario seleccionar los siguientes componentes, los cuales se puntualizan en la siguiente TABLA IV:

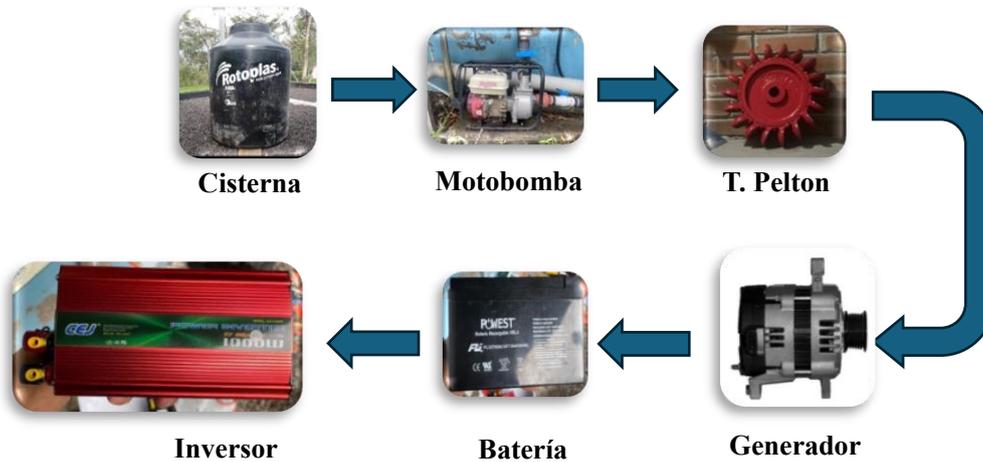
TABLA IV Materiales Empleados

Materiales de laboratorio	Equipos	Software
Motobomba de 6,5 Hp	Turbina hidráulica Pelton 18 pulgadas	AutoCAD
Cisterna de agua	Generador polos de garra 12 V 85 Amp	
	Tubería de presión de 2 inch	
	Inversor de 1,0 hp	
	Batería 12 V DC a 7 Ah	
	Cargas de 20 W	
	Elementos metálicos de ensamblaje	
	Elementos de transmisión	

Nota 4 En la presente tabla se detalla los materiales utilizados, tanto los materiales de laboratorio y las componentes que se deben adquirir.



3.7.1. Diagrama de implementación



Por medio de las componentes seleccionadas para la construcción del módulo, a continuación, se ilustra el diseño. Con ello, se establecen los elementos y ubicaciones, las funciones que cumplirán.

3.7.2. Cisterna de agua

La cisterna de agua de 1,100 litros, situada en la parte posterior de los laboratorios de la carrera de electricidad (ver Fig. 16), actúa como el principal reservorio del agua, garantizando un suministro controlado de agua para el aprovechamiento energético de la turbina. Según la ficha técnica, esta cisterna cuenta con una estructura de tri-capa, que consiste en una primera capa exterior de polietileno de alta resistencia. Otra capa intermedia de espuma rota y por último una capa inferior con propiedades antibacterianas. (AB).



Fig. 16 Cisterna AB de 1,100 litros.



3.7.3. Motobomba

Es una máquina de combustión interna, que permite la succión y transporte de líquidos a ciertas distancias o alturas. El combustible que maneja es la gasolina y es lubricado con aceite, también su refrigeración es por aire, por los disipadores del block así se ilustra en la Fig. 17.

Esta motobomba de marca comercial OUSEN dispone de la siguiente ficha técnica descrita detalladamente en la siguiente TABLA V:

Modelo	OS-20B
Salida máxima	6,5 Hp
Método de arranque	Retroceso
Cabida del tanque de combustible	3,6 litros
Altura de entrega máxima	22 m
Elevación de succión	6 m
Deslizamiento de agua máxima	8,33 litro/segundos
Peso	21,8 kg
Dimensiones (L x An x Al)	480x380x400 mm

TABLA V Especificaciones de motobomba de succión.



Fig. 17 Motobomba de succión

3.7.4. Tuberías

Aquellos ductos flexibles y fijos que permiten el desplazamiento del agua para ser utilizado con el fin pertinente que en este caso es la generación de electricidad con un caudal controlado para el estudio que tiene como objeto este proyecto de implementación.

3.7.4.1. Tubería de succión

Estas tuberías (véase la Fig. 18) tienen características específicas para la succión del agua, ideales para trabajar con motobombas, las cuales se detallan:

- Presión de operación estándar: 70 psi
- Temperatura promedio de operación: -10°C a más de 120°C
- Composición de tubo interno: caucho sintetizado de color negro



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- Composición de cubierta interior: caucho sintético



Fig. 18 Manguera de succión.

3.7.4.2. Tubería de presión y conducción

Se empleó tubería de policloruro de vinilo (PVC) para la conducción de agua, la cual fue fabricada y certificada conforme a las regulaciones NTE INEN 2497. Este tipo de ductos está especialmente diseñado para la conducción del agua en viviendas y edificaciones, ofreciendo una elevada resistencia a diferentes presiones. Por consiguiente, se presentan las especificaciones del data sheet de la tubería. Fig. 19. [35]

Diámetro Nominal (in)	Diámetro nominal exterior	Espesor de pared	Diám. Interior	Presión Nominal del tubo		
	mm	mm	mm	MPa	psi	Bar
1/2	21.34	3.73	13.88	2.9	420.6	29.0
3/4	26.67	3.91	18.85	2.34	339.4	23.4
1	33.4	4.55	24.3	2.21	320.5	22.1
1 1/4	42.16	4.85	32.46	1.79	259.6	17.9
1 1/2	48.26	5.08	38.1	1.65	239.3	16.5
2	60.32	5.54	49.24	1.38	200.2	13.8

Fig. 19 Especificaciones de tuberías de presión.



3.7.5. Generador Polos de garra

El funcionamiento del alternador o máquina síncrona (véase la Fig. 20) como generador, es ampliamente utilizado tanto en la industria automotriz como en la producción de energía, debido a su bajo requerimiento de mantenimiento. Esta característica lo convierte en una opción ideal para mantener la batería del vehículo constantemente cargada, alimentando así todos los sistemas eléctricos, dado que el generador opera siempre que el motor está en marcha. [36]

En la siguiente Tabla VI se especifica el generador de polos de garra seleccionado para el proyecto:

Tabla VI Especificaciones del generador polos de garra.

Alternador 96540541	
Corriente de carga [A]	85
Poleas	1
Voltaje [V]	12
Poleas – \varnothing [mm]	50
Numero de canales	6
Tipo de refrigeración	Aire
Posición	10L
Artículo complementario	Regulador de voltaje
Agujeros de fijación	3



CARRERA DE ELECTRICIDAD



Fig. 20 Generador polos de garra.

3.7.6. Inversor de Corriente DC/AC

Un inversor de corriente convierte la energía de corriente directa (DC) en corriente alterna (AC) (ver Fig. Fig. 21 con el propósito de aprovechar la electricidad generada a partir de fuentes de generación limpia, como la energía solar y fotovoltaica obtenida mediante un panel solar.). En nuestro caso, la energía generada a través de una turbina Pelton se almacena en una batería antes de pasar por el inversor de corriente. Este dispositivo incluye diversos componentes electrónicos que filtran y amplifican la señal, transformándola en una onda senoidal de corriente alterna, que luego puede ser inyectada a la red eléctrica o utilizada en instalaciones eléctricas independientes. Esto permite obtener beneficios económicos y ambientales al aprovechar la energía generada por recursos naturales. [37]

A continuación, se detalla en la siguiente TABLA VII las especificaciones del inversor:



TABLA VII Especificaciones de Inversor

Inversor de corriente CEJ-1000P	
Potencia [W]	1000
Entrada	10 - 15 V DC
Salida	110 V AC
Alto x Largo x Ancho	7,2 x 20 x 14,5 cm
Largo de cable	85 cm



Fig. 21 Inversor

3.7.7. Batería VRLA 12 V DC 7.5Ah

Sistema de almacenamiento de energía eléctrica (véase la Fig. 22) generada por una fuente alternativa, como componente del proyecto será para el inicio del funcionamiento de nuestro generador polos de garra, el cual necesita corriente de arranque en el rotor para generar el campo y luego alimentarse por sí solo, ya con el movimiento de este. En la siguiente TABLA VIII se especifican los datos de la pila.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

TABLA VIII Especificaciones de Batería.

Modelo POWEST VRLA FL1275GS	
Tecnología	VRLA
Voltaje [V]	12
Capacidad [Ah]	7.5
Corriente continua 18° [A]	2.16
Largo x ancho x alto	135 x 75 x 133
Equivalente	12N7-3B / 47040



Fig. 22 Batería de GEL

Por medio de la metodología planteada al inicio de este capítulo se detalló el paso a paso de cada etapa. La construcción de este módulo, la identificación de los materiales y el diseño a implementación para llegar a las pruebas de funcionamiento que se detallarán en el siguiente capítulo. Cada material hace de vital importancia para el funcionamiento de este proyecto. Cabe recalcar que para el dimensionamiento de la turbina Pelton se empleó una metodología hipotética deductiva, ya que para ello se estudió la bibliografía donde se detallaron ciertos coeficientes tomando en cuenta parámetros ideales que no hacen alusión a este estudio. Para las pruebas de funcionamiento se harán válidas las hipótesis aplicadas en los cálculos, de este modo se aplicará la metodología experimental para el proyecto planteado.



CAPÍTULO IV

RESULTADO Y ANÁLISIS

En este capítulo se expondrán los resultados alcanzados previo al desarrollo de diseño, así como la implementación realizada, las pruebas de desempeño de la máquina con carga y sin carga. Se darán a conocer a detalle los datos obtenidos en cada medición. Todo el sistema de generación estará controlado por un tablero que se indicará a detalle el conexionado y la función que cumple. Para concluir este capítulo se redactará las conclusiones y recomendaciones que se dedujeron al desarrollar este trabajo de titulación.

4.1. Diseño de turbina Pelton

Mediante las fórmulas matemáticas mencionadas en el capítulo III se procede al cálculo correspondiente de los componentes que conforman la turbina Pelton.

4.1.1. Potencia eléctrica aproximada normal P_e :

Para la potencia aproximada para el cual se diseñó nuestra pico generadora hidroeléctrica de manera global, para ello, se utilizó la Ecuación (1) donde utiliza como parámetros la utilidad de la turbina η , el peso determinado del agua γ , el caudal Q y la elevación H . Estos valores dan como resultado kW , lo cual para este caso es importante este resultado ya que estima la cantidad de potencia que sacará de provecho de nuestro generador polos de garra, tomando en cuenta que el mismo está diseñado a 85 amperios en carga de generación a 12 V DC, con 1200 rpm obtendríamos un aproximado del 75% del P_e por pérdida de inversor, fricción del eje, m.s.n.m., temperatura. Estos agentes afectan la generación por lo cual se estima esta generación sea inferior.

$$P_e = 0,50 * 9,81 \left[\frac{m}{s} \right] * 0,01117 \left[\frac{m^3}{s} \right] * 20[m] = 1,095 [kW]$$

Ecuación (1)



4.1.2. Para la velocidad específica n_s

En este apartado se despeja la velocidad de específica n_s , la cual no es de sincronismo, para luego el valor n remplazarlo con un valor aproximado según el número de polos del alternador [33]. Para este caso se optó por 450 rpm lo cual es el recomendado por el autor de la Ecuación (2), por el número de polos del generador, adicional se convirtió el valor de Pe a CV para la realización de este cálculo.

$$\eta_s = \frac{450 * (1,489)^{\frac{1}{2}}}{(20)^{\frac{5}{4}}} = 12,98 \quad \text{Ecuación (2)}$$

4.1.3. La velocidad absoluta c_1 y velocidad tangencial u^*

Para el cálculo de velocidad absoluta c_1 se optó por tomar el factor de velocidad absoluta de entrada $C_1 \approx 0,98$. Tomando en cuenta que este valor es adimensional, como menciona el autor de la Ecuación (3). El resultado de la velocidad absoluta nos indica la velocidad en la salida del inyector a la entrada de la turbina, permitiéndonos dimensionar el cangilón necesario. Con esta respuesta podemos tener noción del tamaño de cucharas que tendrá nuestra turbina.

$$c_1 = 0,98 * \sqrt{(2 * 9,81 * 20)} = 19,41 \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Por otro lado, tenemos la velocidad tangencial Ecuación (4), que es el resultado del producto de la velocidad tangencial y el coeficiente de rozamiento. Este valor que obtenemos permite dimensionar el rodete de acuerdo con la velocidad que obtendremos en los cangilones.



Este valor es bueno, ya que con ello tendremos un rodete no superior a las 20 pulgadas, lo cual optimizará la estructura de diseño.

$$u^* \approx 0,46 * c_1 = 0,46 * 19,41 = 5,2 \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Ecuación (4)}$$

4.1.4. Diámetro del chorro

Ya despejada la ecuación del caudal la cual es la Ecuación (5), se obtiene la Ecuación (6) del diámetro de chorro. Este valor se acerca a la pulgada de diámetro, por lo cual se optimizó a este valor en el diseño final. Este valor es un valor acertado, ya que se busca incrementar la presión del inyector por medio de una reducción de la tubería de 2 pulgadas a 1 pulgada, ya que toda la tubería de conducción es de 2 pulgadas.

$$d = \sqrt{\frac{Q^* * 4}{c_1 * \pi}} = \sqrt{\frac{0,01117 * 4}{19,41 * \pi}} = 0,027 [m] \quad \text{Ecuación (6)}$$

4.1.5. Dimensiones de Cuchara o Cangilón

Ya con los valores del diámetro del chorro se utilizan la Ecuación (7) para resolver el producto de cada coeficiente del cangilón, permitiéndonos diseñar y optimizar sus curvas para el golpe de ingreso del chorro y aprovechamiento del mismo. Estos valores serán referenciales, ya que para optimización del rodete y el espaciamiento entre cangilones se redondeó estos valores a los de la representación gráfica indicadas en el diseño en AutoCAD.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

$$L = 2,10 * d = 2,10 * 2,7 [cm] = 5,67 [cm]$$

$$B = 2,50 * d = 2,50 * 2,7 [cm] = 6,75 [cm]$$

$$T = 0,85 * d = 0,85 * 2,7 [cm] = 2,29 [cm]$$

$$t = 2 * d = 2 * 2,7 [cm] = 5,4 [cm]$$

Ecuación (7)

4.1.6. Representación gráfica de Cangilón

Mediante el software AutoCAD se procedió a la representación del cangilón tomando en cuenta los cálculos realizados anteriormente. Con ello, se planteará una parte importante de la turbina Pelton para el diseño final de la misma. Las unidades de medida se encuentran en centímetros y se toman valores inmediatos superiores por el diseño del cangilón. Todos los valores se detallan en la Fig. 23.

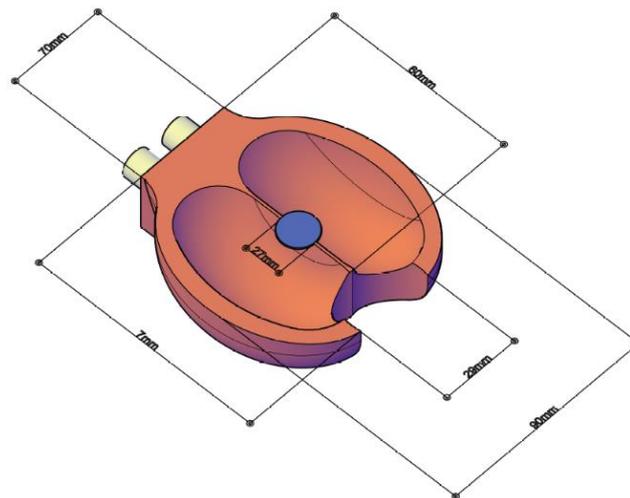


Fig. 23 Diseño de Cangilón en AutoCAD.

4.1.7. Dimensión del rodete

Con la Ecuación (8), se obtuvo la dimensión del rodete, donde el valor de n se lo dividió para 2 como recomienda el autor, ante falta de información de las rpm que alcanzaría la turbina Pelton ya puesta en marcha. Este resultado es el óptimo para el diseño de la turbina Pelton y sobre todo la optimización de los espacios t entre los cangilones.



$$D = \frac{60 * 5,2}{\pi * \left(\frac{425}{2}\right)} = 0,441 [m]$$

Ecuación (8)

4.1.8. Número de z cucharas y paso t

El número de cucharas z se obtuvo de la Ecuación (9) donde el resultado es 25 unidades, pero por optimización de espacio del rodete el cual es ajustó a las 18 pulgadas, se optó por 18 unidades con una relación de pulgada por cuchara por la dimensión del rodete. Las 25 unidades saturarían los espacios entre cucharas, donde tocaría ajustar la dimensión de cucharas, esto implicaría cambios en el chorro y efectos adversos a todo el diseño de esta.

$$z = \frac{\pi * 0,441}{0,054} = 25,65$$

Ecuación (9)

Para el espaciamiento entre cucharas viene dada por la Ecuación (10), no se realizó ningún cambio, este espaciamiento es el ideal para la recirculación del agua entre cucharas, sin impedir la fuerza que se ejerza entre el inyector y la tangencial de cada reflejo proyectado al centro de cada cuchara.

$$t = \frac{\pi * 0,441}{25} = 0,055 = 5,5 [cm]$$

Ecuación (10)

4.1.9. Relación del Diámetro

Esta relación viene dada por la Ecuación (11), donde el valor no debería ser muy mayor por que perdería coherencia entre el tamaño del rodete y el tamaño de las cucharas, el autor recomienda que para $n_s = 20$ tomado en cuenta que este valor tiene un buen rendimiento para turbinas, la relación viene dada por $\frac{D}{d} = 12$.



En nuestro caso, el valor se superior a 12, tomando en cuenta que se optimizó el n_s con relación a nuestro generador polos de garra, para lo cual también se tomarán optimizaciones tanto en el número de cucharas, así como el espaciamiento de estas para tener un buen rendimiento.

$$\frac{D}{d} = \frac{441}{27} = 16,33 [mm]$$

Ecuación (11)

4.1.10. Representación gráfica del Rodete

Ya obtenido los valores del rodete se procedió a la representación gráfica en el software AutoCAD. Las dimensiones establecidas se encuentran cercanas a los calculados. Por facilidad se obtención de un rodete se ajustó el valor final, como se logra ver en la Fig. 24.

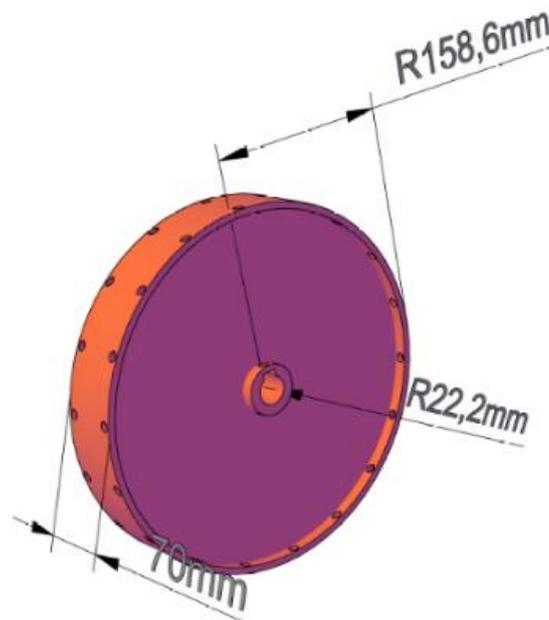


Fig. 24 Representación gráfica del rodete en AutoCAD.



4.1.11. Representación gráfica de la Turbina Pelton

Mediante los parámetros obtenidos se modeló la turbina Pelton. Los valores se encuentran en centímetros. La turbina Pelton se encuentra ajustada su medida a 457,2 mm de cangilón a cangilón, de forma que obtenemos 18 cangilones, que cubren todo el contorno del rodete. En la siguiente Fig. 25 se aprecia a detalle.

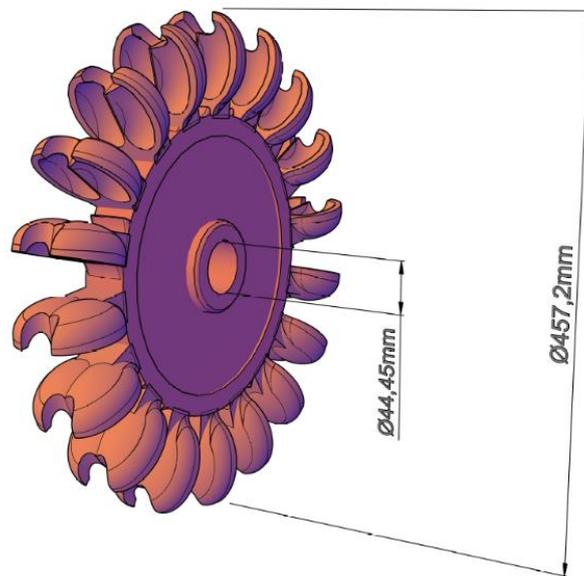


Fig. 25 Representación gráfica de la Turbina Pelton 18 Cangilones.

4.2. Representación gráfica del módulo en AutoCAD

En este apartado se presenta la representación gráfica del módulo estructural que soporta la turbina hidráulica y el generador polos de garra con las dimensiones diseñadas para su construcción. Se detalla cada elemento estructural con sus medidas correspondientes.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

4.2.1. Representación gráfica del eje

El elemento estructural de hierro de transmisión, con un diámetro de 44,45 mm y una longitud de 500 mm, tiene la función de soportar la turbina Pelton, asegurando su giro adecuado. Este componente está respaldado por chumaceras de igual diámetro, las cuales permiten un soporte estable y un funcionamiento óptimo de la turbina. Fig. 26.

4.2.2. Cubierta superior e inferior

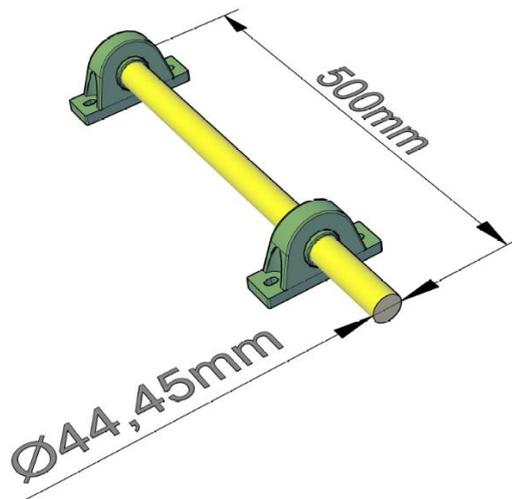


Fig. 26 Eje de hierro de transmisión de 1 pulgada 3/4.

Elemento estructural encargado de hermetizar los fluidos que muevan la turbina, protegiendo los componentes instalados en su entorno. También permite el correcto flujo del cauce hacia la cisterna. Se compone de told 1 mm de espesor. Entre la cubierta superior e inferior se encuentra un empaque de 5 mm de espesor por 50 mm de ancho. Entre el eje y la cubierta se ubicó dos retenedores correspondiente a cada lado de 1 pulgada $\frac{3}{4}$ por 20 mm para impedir la salida del agua durante el movimiento del eje. Tanto para la entrada del agua de 2



pulgadas y

la salida del

agua de 4 pulgadas se encuentran en la cubierta inferior como se visualiza en la Fig. 27.

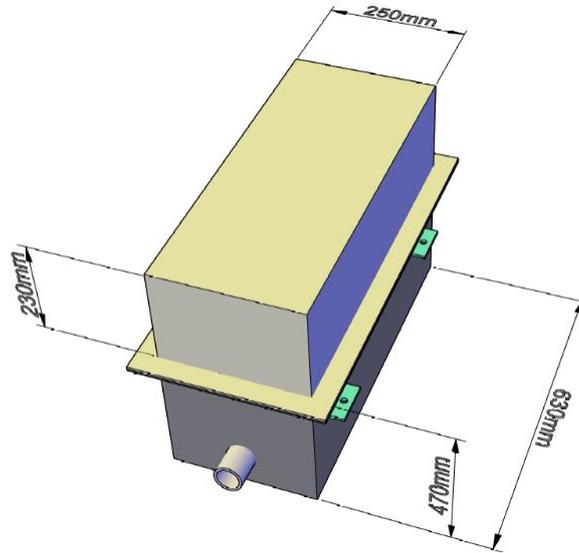
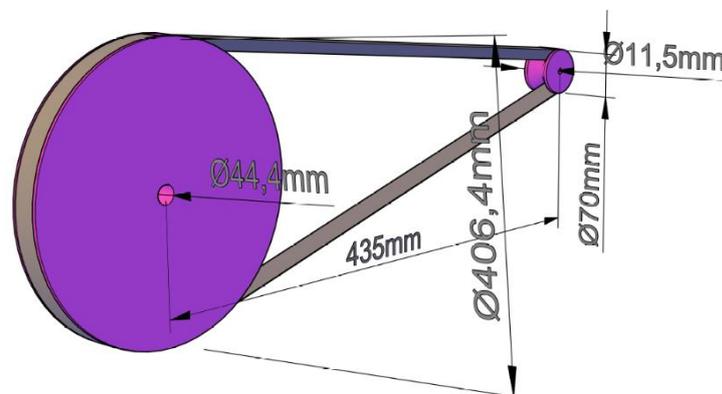


Fig. 27 Cubierta superior e inferior.

4.2.3. Representación gráfica y cálculo de polea, banda

Se optó por adaptar una polea de 70 mm de diámetro para el generador polos de garra, por su espesor y ser de una ranura. Ya teniendo la estructura y las posiciones de cada eje se procedió al cálculo de la polea motriz. Tomando en cuenta ya las revoluciones que presta el eje de la turbina puesta en marcha. Tratando de alcanzar el máximo de desempeño del generador polos





de garra se optó a una polea 1:6 de diámetro con respecto a la polea conducida. En la siguiente Ecuación (12) para la relación de transmisión.

Se aprecia las dimensiones para el cálculo de la analogía de transmisión tomando como valores el tamaño de la polea motriz y la polea conducida $\frac{\phi_1}{\phi_2}$ valor que nos permite tener como resultado cuanto incrementaría con respecto a la polea motriz nuestro generador polos de garra.

$$i = \frac{40,64 [cm]}{7 [cm]} = 5,80 \quad \text{Ecuación (12)}$$

Cálculo de revoluciones de la polea conducida con polea de 1:5,8 respecto a la motriz se da por la Ecuación (13), para lo cual este resultado tiene como objeto alcanzar esta velocidad en rpm de manera teórica con la turbina en su máxima capacidad. Tomando en cuenta que el generador polos de garra es de 4 polos a una frecuencia de 60 Hz, superaría el 50% de revoluciones de capacidad de este generador.

$$\omega_2 = \frac{225 [rpm] * 40,6 [cm]}{7 [cm]} = 1306 [rpm] \quad \text{Ecuación (13)}$$

Cálculo de la dimensión de banda viene dado por la Ecuación (14), donde se optó por el valor comercial de 170 cm para tener un juego de la polea conducida que para este caso es la del generador polos de garra, y no tenerla tensionada. Este valor es idóneo por la distancia entre poleas.



Se decidió por banda tipo A ranurada para no tener pérdidas por deslizamiento con las poleas, también por el diseño de las poleas, al ser de una sola ranura.

$$\frac{\pi}{2} * (40,6 + 70 + 2 * 43,5 + \frac{(40,6 - 7)^2}{4 * 43,5}) = 168,25 \text{ cm}$$

Ecuación (14)

4.2.4. Representación gráfica del conjunto estructural y montaje.

Con los elementos necesarios obtenidos, se realizó el modelado y ensamblaje de cada componente. La construcción se detallará en los anexos presentados a continuación en el presente documento. Para detallar el soporte estructural se optó por un ángulo de 50 mm x 50 mm. Esto se ilustra en la siguientes Fig. 30 y Fig. 29

Las chumaceras de 1 ³/₄ pulgadas para soportar el eje de hierro de transmisión de 500 mm de longitud, cada chumacera dispone de engrasador y prisioneros. El eje dispone de orificios para los prisioneros de la turbina Pelton en el centro. Tanto la cubierta superior y la cubierta inferior están construidas con acero galvanizado y selladas con pintura sintética automotriz para protegerle contra la corrosión. Cada ranura dispone de cordones de suelda y sellos de silicona. La separación entre las cubiertas dispone de un empaque de 1cm de alto, 5 cm de ancho. Para el giro del eje dentro de la cubierta contiene de retenedoras automotrices de 1 ³/₄ pulgadas por 20 mm de ancho, permitiendo el giro libre del eje sin filtraciones de agua ante presión. Para la entrada del agua dispone de una llave de paso con un manómetro de 60 psi y una tubería de conducción de acero galvanizado en roscable de 2 pulgadas para posteriormente por medio de un neplo de 300 mm de largo, en la punta de este con un accesorio de reducción de 2 pulgadas 1 pulgada, crear el inyector, responsable del chorro de la tobera hacia el cangilón. Para el desagüe de la cubierta inferior se utilizó una tubería de PVC de 4 pulgadas suficiente para la salida de agua, esta aprovechará los desniveles establecidos en la cubierta inferior para mayor conducción del agua al retornar a la cisterna.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

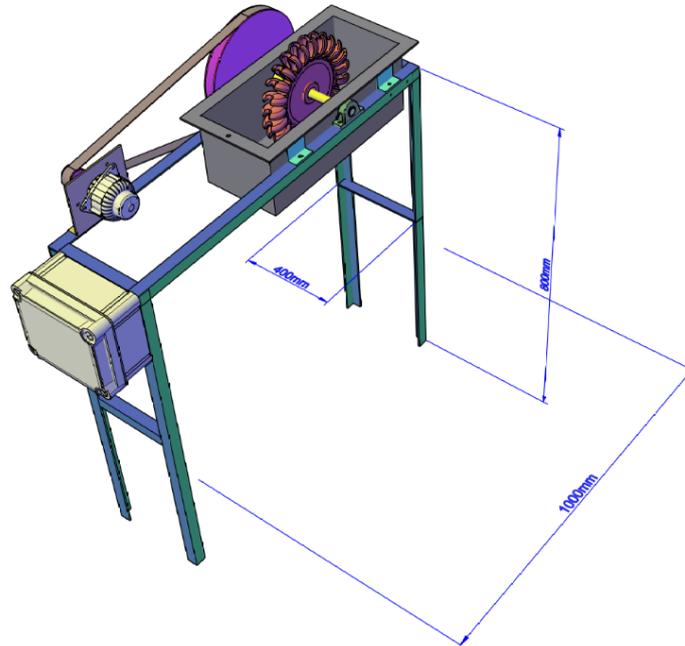


Fig. 30 Representación gráfica de conjunto estructural A

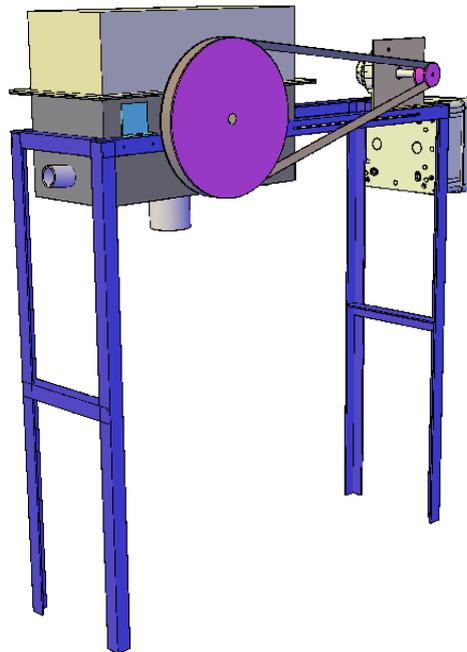


Fig. 29 Representación gráfica de conjunto estructural B.



4.2.5. Construcción y Montaje:

Ya con los componentes adquiridos se prosiguió a la cimentación e inicio de operación de la máquina. En las siguientes imágenes se presentan el desarrollo de la implementación.

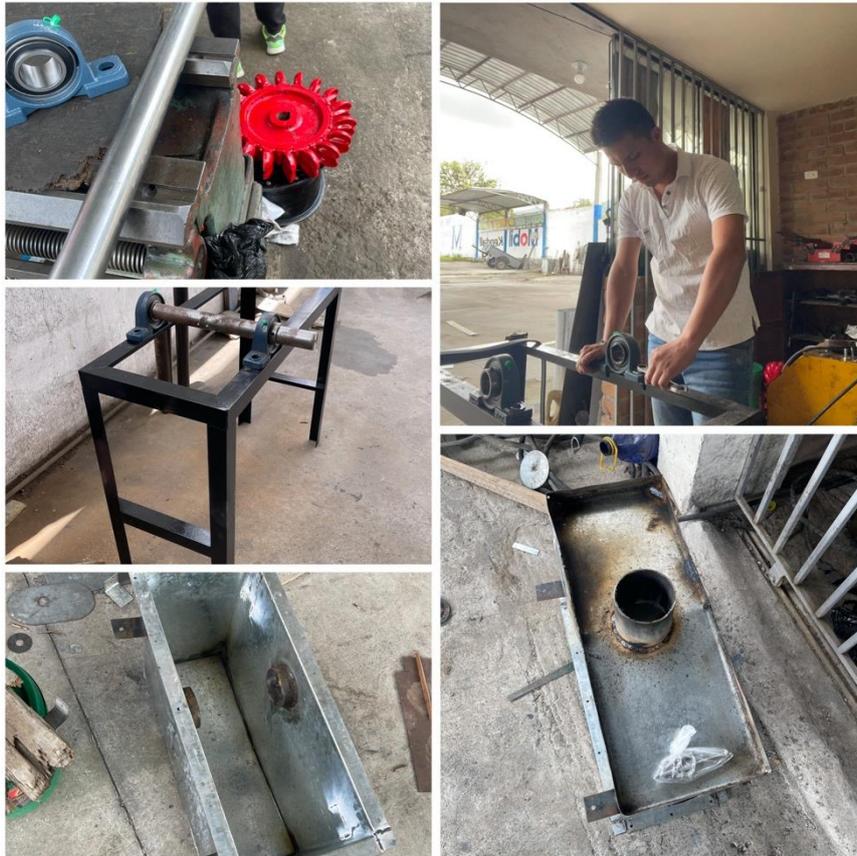


Fig. 31 Desarrollo de la estructura.

Mediante el diseño planteado se procedió al desarrollo del eje, el cual nos permitió limitar donde se asentarían las chumaceras que a su vez estas tuvieron que estar sujetas a la estructura angular. Utilizando hierro de transmisión de 1 pulgada $\frac{3}{4}$ se realizó un cepillado en el torno y los respectivos perforados para los prisioneros para el eje y las chumaceras. Ya con el eje a disposición se procedió al ensamblaje de la estructura de ángulo. Con 40 cm de límite para las chumaceras y en el centro para el giro de la turbina. Con el toldo de 1 mm de procedió hacer los dobleces necesarios para desarrollar la cubierta inferior como superior.



En la cubierta inferior se creó un desnivel para mayor caída del agua al desagüe. En la entrada del eje se realizó unos espaciadores para montar unos retenedores, principal componente que permite que gire el eje sin la fricción de la cubierta y a su vez no permite la salida del agua. Todo esto se logra apreciar en la Fig. 31.



Fig. 32 Acabados del módulo.

Para los acabados del módulo ya con las componentes desarrolladas, se procedió a el pintado tanto de la estructura angular con pintura anticorrosiva color negro y para la cubierta con pintura sintética automotriz color azul. Entre la cubierta superior e inferior se dispuso un empaque de 5 cm de ancho, 2 metros de largo y 0,5 cm de espesor. Con una cara inferior pegada con cemento de contacto y la parte superior limpia.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Para el ajustado entre la cubierta se dispuso 15 pernos galvanizados de $\frac{1}{4}$ por una pulgada. En el ingreso del agua se dispuso un neplo galvanizado de 300 mm con la punta del chorro para el cangilón de 1 pulgada de reducción. Para el ingreso del chorro se soldó una plancha con 3 orificios para sellar la cubierta con un empaque de manera segura. Todo lo descrito se aprecia en la Fig. 32.



Fig. 33 Montaje del módulo y puesta en marcha.

Para terminar la implementación de este módulo se procedió al montaje del conjunto estructural en el patio de pruebas de la especialización de electricidad.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Desde el manguereado con tubería de presión de 2 pulgadas, instalación del desagüe con tubería de 4 pulgadas se realizó para el correcto desempeño del módulo como se aprecia en la Fig. 33. La instalación del tablero general se describe en el siguiente enunciado. Para la puesta en marcha se dispuso el máximo de potencia de la motobomba para pruebas de presión en la tubería ante posibles fugas en las uniones. Ya con las pruebas realizadas, no se encontraron fugas y se apreció el nivel de presión alcanzado por parte del barómetro del inyector, alcanzando 15 psi para su desempeño óptimo. Las revoluciones en el eje de la turbina alcanzaron los 380 a 400 rpm con una fuerza de arrastre elevada por el peso de la turbina de 50 Kg más el del eje que es robusto con un cuerpo de 1 ¾ pulgadas.

4.3. Esquema de conexión para el panel de control para la generación

Para el desarrollo del panel de control se tiene en cuenta el correcto funcionamiento del generador polos de garra. Este generador desempeña su trabajo con la excitación externa de su rotor o campo, creando un electroimán en el contorno de su eje. Esta excitación se realiza por medio de la batería de 12 v DC. La cual previamente debe estar cargada. Una vez excitado su rotor el generador polos de garra por medio de su regulador inyectará la energía necesaria para cargar la batería. Este generador es de 4 polos, por ello es necesario un nivel alto de revoluciones para su desempeño correcto. En este tablero se implementó un selector general para conectar o desconectar la batería, un interruptor tipo ojo de cangrejo para la excitación del rotor con su respectiva luz piloto que muestra la batería en el tablero del vehículo.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Al empezar a generar esta luz se apagará. También se ha implementado un voltímetro DC para visualizar la carga de la batería, así como un voltímetro AC y Amperímetro AC en la salida de la carga AC por medio de una toma de corriente tipo Cooper. El diagrama de conexión realizado en AutoCAD se presenta en la siguiente Fig. 34.

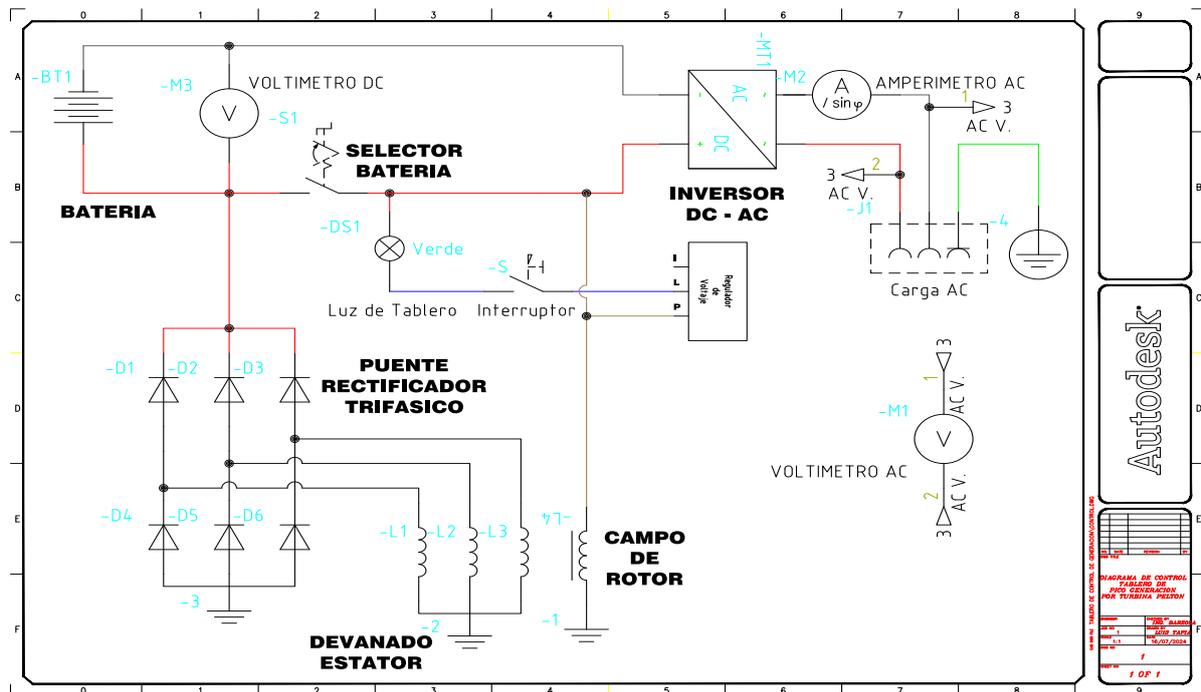


Fig. 34 Diagrama de conexión Tablero de generación.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

4.4. Pruebas de funcionamiento

Ya puesta en marcha la máquina se procedió a las pruebas respectivas con carga. Se obtuvieron los siguientes datos de desempeño de esta. Estos datos se presentan en la siguiente TABLA IX:

TABLA IX Tabla de prueba con carga.

Prueba con carga				
Carga [W]	Voltaje de Carga [V]	Voltaje Generado [V]	Corriente de Carga [A]	RPM de Turbina
9	100	100	0,11	330
20	120	110	0,13	330
18	100	100	0,17	330

A continuación, se presentan los anexos de las mediciones de campo, ejecutadas con la máquina puesta en marcha. Se presentan diferentes cargas implementadas para la toma de muestras desde el tablero de control de generación. Para el desarrollo de las pruebas con carga es necesario poner en marcha a la moto bomba dentro del 75% al 100% para que las revoluciones de la turbina sean las necesarias para romper la inercia de generación del generador polos de garra. Cabe recalcar que mientras la polea motriz sea de más diámetro esta tendrá que realizar más fuerza ya que la polea conducida del generador polos de garra es de menor diámetro. Para cada prueba ya con la turbina puesta en marcha se procede a arrancar la batería por medio del selector y luego el interruptor del excitador, con la luz piloto encendida y luego apagada se entiende que el alternador se encuentra generador y por ende cargando la batería. Por lo cual, se encenderá el inversor y se desconectará la batería para mantenerse con la generación del alternador y conectar las cargas necesarias.



Sin embargo, es importante inspeccionar la batería, ya que esta tiene el objetivo primordial de excitar el rotor del generador polos de garra, por lo cual tiene que tener disponible los 12 v DC es decir, tiene que encontrarse cargada para activar al generador y empezar a cargar. Caso contrario el generador polos de garra solo generará por lapsos de tiempo corto, por falta de excitación del rotor. Todas las descripciones mencionadas se pueden apreciar en la Fig. 35



Fig. 35 Puesta en marcha del módulo.

Los sensores involucrados en el tablero general de generación son los descritos en el diagrama de conexión diseñado en AutoCAD, dentro de ellos se encuentran, voltímetro DC para visualizar la carga de la batería, así como la generación. El amperímetro de corriente alterna (AC) se utiliza para comprobar el consumo de la carga en corriente alterna a través de la salida del inversor. El voltímetro de corriente alterna (AC) mide el voltaje de salida del inversor hacia la carga.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

4.5. Conclusiones

- Esta implementación ha demostrado ser técnicamente viable, ya que con las pruebas realizadas se comprueba que este sistema puede generar energía de manera confiable.
- Es factible diseñar una pequeña central hidroeléctrica (pico generadora) utilizando los parámetros de caudal (Q) y altura (H) para optimizar el rendimiento de una turbina Pelton. Para lograr esto, se deben considerar factores clave como la velocidad específica, la velocidad absoluta y la velocidad tangencial de la turbina. Al ajustar estos parámetros de manera adecuada, se puede maximizar la eficiencia de la turbina y dimensionarla correctamente para aprovechar al máximo los recursos disponibles. Este enfoque asegura una operación eficiente, aprovechando tanto el caudal como la altura de manera óptima.
- La implementación de la pico generadora hidroeléctrica fue posible con los cálculos establecidos en este capítulo, con ello la selección de los componentes para el ensamblaje, montaje y puesta en marcha fue posible, dando como resultado la generación de electricidad para el autoabastecimiento o para aplicaciones de baja potencia en la carrera de electricidad.

4.6. Recomendaciones

- Se recomienda la optimización del diseño del pico generador por medio del estudio y desempeño para con el diámetro del inyector o la implementación de dos o tres inyectores adicionales, permitiendo maximizar la eficiencia de la turbina y sus diversas condiciones operativas.
- Es necesario el estudio de diseño para la alimentación a una microrred para un seccionado de transferencia automática y abastecer un circuito previo a los parámetros recomendados en dicho diseño.

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

- Se recomienda pruebas con un generador síncrono trifásico de 4 polos para alcanzar rápidamente las RPM necesarias para su funcionamiento con cargas variables y sus pruebas de inestabilidad, conexas a una microrred.
- Las pruebas de desempeño con una motobomba de presión de 6,5 Hp conectadas a las tuberías de conducción de la turbina Pelton, comprobando las revoluciones del generador polos de garra a la bomba de succión.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
 APLICADAS**
CARRERA DE ELECTRICIDAD



BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. S. A, «Energías Renovables,» Ediciones la U, 2da Edición, ISBN: 9789587622065, 2014. [En línea]. Available: <https://edicionesdelau.com/producto/energias-renovables/>.
- [2] J. Guo, L. Wu y Y. Mu, «An optimized grey model for predicting non-renewable energy consumption in China. Volume 6, Issue 6.,» Heliyon, Junio 2023. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17037>.
- [3] N. G. T. Zurita, «Diseño e implementación de un prototipo de una picocentral hidráulica para uso rural,» Facultad de Ingeniería Electromecánica, ESPE, Sede Latacunga, Dic 2005. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/3991>.
- [4] F. Nuclear, «Qué es una central hidroeléctrica?,» Foro Nuclear, 10 Ago 2021. [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobredistintas-fuentes-de-energia/que-es-una-central-hidroelectrica/>.
- [5] F. R. N. J. Ismael Valdez, «Diseño de una mini central hidroeléctrica,» Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação, Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/342328500>.
- [6] V. C. I. A. Palomeque Jimbo Vinicio Martin, «Diseño de una central hidroeléctrica para abastecer la demanda del consumo eléctrico de Plantaciones Malima Cía. Ltda.,» UPS, 2019. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17404>.
- [7] M. R. A. Javier, «Desarrollo de una herramienta gráfica para la simulación de una minicentral hidroeléctrica. Caso de estudio Minicentral Espejo,» Universidad Técnica del Norte, 11 Dic 2020. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10796>.



- [8] A. C. F. Andrés, «Diseño conceptual de centrales hidroeléctricas a bombeo usando agua desalinizada. Tesis Pregrado,» Universidad de Chile, 2022. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189091>.
- [9] C. T. B. David, «Implementación de una pico-generadora hidroeléctrica con turbina tipo turgo en el patio de pruebas de la carrera de electricidad,» Universidad Técnica del Norte, 18 Sep 2023. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14781>.
- [10] M. C. E. Geovanny y S. Q. B. Eduardo, «Diseño y análisis para la implementación de un sistema de pico-aprovechamiento en generación hidroeléctrica,» Universidad Politécnica Salesiana, Nov 2021. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21296>.
- [11] C. G. M. Geovanny y S. U. O. Fernando, «Estudio de factibilidad para la implementación de una pico central hidroeléctrica a la cascada Santa Susana de Chiviaza - Provincia de Morona Santiago - Ecuador,» UPS, Nov 2023. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26528>.
- [12] O. T. L. Fernando y C. B. J. David, «Estimación de los parámetros del generador síncrono del módulo TNA a partir de oscilogramas eléctricos,» Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Eléctrica , 2020. [En línea]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/289/.
- [13] J. M. Prieto, «Instalación de un sistema de protecciones eléctricas en una máquina síncrona de 4900 kVA ETSII,» Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Industriales (UPM), Madrid, 2017. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/45519/1/TFG_JUAN_MANUEL_ESTEBAN_PRIETO.pdf.
- [14] Y. A. C. Jesús, «Rediseño de devanado de un generador síncrono de polos salientes bifásico para funcionamiento como generador trifásico,» UTN, Ibarra, Ecuador, 1 Marzo 2024. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15652>.
- [15] C. S. J., «Máquinas eléctricas,» Editorial MC-Graw Hill, 5ta Edición, ISBN: 978-607-15-0724-2, 2012. [En línea]. Available:



https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf.

- [16] M. A. G. Pérez, «Turbomáquinas, Generadores Síncronos,» Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería eléctrica y electrónica,, 26 06 2013. [En línea]. Available: <https://seb3b59fa63c33acb.jimcontent.com/download/version/1410579098/module/10291107057/name/3%C2%B0%20TRAB%20-TURBOMAQUINAS-GENERADORES%20SINCRONOS.pdf>.
- [17] A. Domínguez Rodríguez, «Integración energética en EDAR mediante simulación de un ciclo térmico de aprovechamiento de biogás,» Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales Autoridad UVA, 2023. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/60481>.
- [18] L. E. Rueda Rincón, «Máquinas Eléctricas,» Universidad Tecnológica de Bolívar, ISBN: 978-958-8862-23-1, 2016. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12585/9895>.
- [19] A. FAASA, «Generadores de corriente alterna,» Fundamentos de electricidad, Julio 2017. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial85/doc17tut85.pdf>.
- [20] M. C. W. Javier, «Implementación de un prototipo de generador síncrono con Imanes permanentes y núcleo de polímeros,» Universidad Técnica del Norte, May 2023. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13882>.
- [21] G. Reixa, «Diseño de un motor síncrono de imanes permanentes para el accionamiento de un dispositivo elevador,» Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Industriales (UPM), 2019. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/54414/1/TFG_ALVARO_GOMEZ_REIXA.pdf.
- [22] R. Pozueta, «Máquinas eléctricas síncronas,» 2015. [En línea]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>.
- [23] C. T. M. Santiago y P. C. J. Christian, «Diseño e implementación de un banco de pruebas de alternadores, para la obtención de las curvas características de amperaje y voltaje y determinar su



estado funcional,» ESPOCH, junio 2022. [En línea]. Available:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17994>.

- [24] C. T. O. Sebastián y M. M. K. Ramiro, «Desarrollo de software para la simulación de generador sincrónico y generador asincrónico orientado al uso de prácticas del laboratorio de máquinas eléctricas en Matlab,» Quito, EPN, 11 Agosto 2021. [En línea]. Available:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21769>.
- [25] L. A. R. M. Góngora Cruz, «Diseño e Implementación de un Módulo de Turbina Francis para el Laboratorio de Termofluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica Y Mecatrónica,» Universidad católica Santa María, 2020. [En línea]. Available:
<https://1library.co/document/yj7ewp5y-implementacion-laboratorio-termofluidos-profesional-ingenieria-mecanica-electrica-mecatronica.html>.
- [26] T. C. S. H. Canaza Choqueluque Jean, «Diseño e Implementación de un Módulo de Turbina Pelton para el Laboratorio de Energía de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica,» Universidad Católica de Santa María, 12 11 2018. [En línea]. Available:
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8313>.
- [27] E. A. V. Alfonso, «Modelo tridimensional de una turbina hidroeléctrica para capacitación,» UTN, 16 nov 2022. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13221>.
- [28] J. Paraguay Cconovilca, «Selección óptima de la turbina hidráulica para el aprovechamiento del recurso hidroenergético de la mini central hidroeléctrica de la CC.NN. Betania,» UNCP, 2021. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6482>.
- [29] S. Calero Anaya, «Metodología para la obtención de la configuración de mínimas pérdidas tobera-inyector de una turbina Pelton para 33 l/s mediante simulación CFD,» PUCP, Lima, 2021. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18757>.



- [30] S. R. J. Alexander, «Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton, mediante un estudio paramétrico,» EPN, 24 Jun 2020. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20949>.
- [31] D. S. B. Rivero, Metodología de la Investigación, Shalom, ISBN: 978-959-212-783-7, 2008, pp 39 - 50.
- [32] Á. M. E. David, «Implementación de un emulador de caudal con sistema Scada para pico generación hidroeléctrica,» Universidad Técnica del Norte, 11 Oct 2021. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11557>.
- [33] J. G. Soriano, Mecánica de fluidos incomprensibles y turbomáquinas hidráulicas 5ta Edición, Madrid: Ciencia 3, S.L., ISBN: 84-95391-01-05, 2002, pp 557 - 601.
- [34] M. C. J. C. F. V. R. S. Tomás Barros, «CONSTRUCCIÓN DE UNA CAJA DE CAMBIOS MEDIANTE TRANSMISIÓN DE POLEAS. Revista FIMAQ. Vol. 2 Num. 1. Dic 25, 2018,» [En línea]. Available: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/fimaq/article/view/1105>.
- [35] TIGRE, «Ficha técnica PVC SCH80 línea de agua fría,» 2020. [En línea]. Available: https://tigrecombr-prod.s3.amazonaws.com/fichas/tigre.com.ec/files/produtos/ficha-tecnica/pt_ficha-tecnica_sch80_2020.pdf.
- [36] J. Campo Barbero, «Plataforma de ensayo y control de un alternador convencional de automoción,» Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales, 2019. [En línea]. Available: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37747>.
- [37] J. I. L. Perez, «Diseño e implementación de un inversor de corriente directa a bajo costo,» Universidad de Guanajuato, 2017. [En línea]. Available: <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/3264>.