



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADOS

### MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

#### MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

**Título:**

---

### IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE

---

Protocolo previo a la obtención del título de Magister en Electricidad mención  
Sistemas Eléctricos de Potencia

**Autor:**

Tapia Villamarin Antonio Agustin

**Tutor:**

MSc. Cristian Fabian Gallardo Molina

LATACUNGA –ECUADOR  
2022

### **AVAL DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE” presentado por TAPIA VILLAMARIN ANTONIO AGUSTIN, para optar por el título magister en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

### **CERTIFICO**

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, noviembre, 22, 2022



MsC. Cristian Fabian Gallardo Molina

C.C.: 050284769-2

### AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, noviembre, 22, 2022



.....  
PhD. Secundino Marrero Ramírez  
C.C.: 175720790-7  
Presidente del tribunal



.....  
MsC. Edgar Roberto Salazar Achig  
C.C.: 050284761-9  
Lector 2



.....  
MsC. Carlos Francisco Pacheco Mena  
C.C.: 050307290-2  
Lector 3

## DEDICATORIA

Dedico este título universitario a mi madre Norma Piedad Tapia Villamarin quien me ayudo con sus consejos en todo instante de mi vida y a mis dos angelitos que están en el cielo José Ramón Tapia Carrera (PÁ PEPE) y María Segunda Guadalupe Villamarin Tapia (MAMI SEGUNDA), quienes desde el cielo me cuidan y me protegen, quienes confiaron en mí para lograr esta meta, siendo los pilares fundamentales en mi vida, guiándome por un camino de bien con valores, respeto y humildad, todo su esfuerzo y confianza están retribuidos en este título profesional.

Antonio Tapia.

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios todo poderoso por no abandonarme en ningún momento de mi vida.

Retribuyo este título a mi madre: Norma Tapia por todo el esfuerzo impartido en mí en los momentos más difíciles de mi vida, su apoyo incondicional, emocional y económico que me ayudado a lograr cumplir una meta más en la vida.

Antonio Tapia.

### RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, octubre 21, 2022



.....  
Antonio Agustin Tapia Villamarin  
CC.: 0504318080



### RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, octubre 21, 2022



.....  
Antonio Agustin Tapia Villamarin  
CC.: 0504318080

### AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, noviembre, 22, 2022



PhD. Secundino Marrero Ramírez

C.C.:1757207907





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título:** IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE.

**Autor:** Tapia Villamarin Antonio Agustin

**Tutor:** Ing. MsC. Gallardo Molina Cristian Fabian

**RESUMEN**

Actualmente se han desarrollado proyectos de microgeneración, en especial en sitios que debido a sus condiciones geográficas impide el acceso del suministro eléctrico por parte de las empresas distribuidoras, aportando así al uso de fuentes de energía renovables. En el presente proyecto, la vivienda ubicada en el barrio Guadalupe, carece del suministro de energía eléctrica, la cual al instalar un sistema de generación eléctrica beneficiará a los usuarios que residen en la vivienda. El sistema de generación está conformado mediante un embalse de captación de 25 litros, una turbina tipo Turgo de baja potencia, un generador monofásico que ayuda a la conversión de la energía mecánica a energía eléctrica y consta de un sistema de control para verificación de los parámetros de generación del sistema.

Al realizar la inspección en campo y conocer el lugar donde se ejecutara la captación del principal componente que es el recurso hídrico, se procede a realizar los cálculos para el dimensionamiento del sistema de microgeneración, se obtiene los siguientes valores; un caudal considerable de 5 lt/s con una altura de 14m, la cual genera una presión de 19,88 PSI, se seleccionó una tubería de 2" que soporta hasta 60 PSI, una turbina Turgo con una eficiencia del 85%, mediante el procedimiento matemático para el diseño consta de 12 alabes, con un inyector teniendo una fuerza de impulso de 69.1 N, una potencia eléctrica máxima generada de 583W, de acuerdo a pérdidas se obtiene una potencia efectiva de 400W, se considera un generador de imanes permanentes de 4 polos y un sistema de control.

**Palabras clave:** Microgeneración; Turbina Turgo; Alabes; Generador; Sistema de control; Energía renovables; recurso hídrico.



UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI  
DIRECCION DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

**Title:** IMPLEMENTATION OF A PICO HYDROELECTRIC POWER PLANT USING A LOW-POWER TURGO TURBINE IN GUADALUPE NEIGHBORHOOD.

**Author:** Tapia Villamarin Antonio Agustin  
**Tutor:** Gallardo Molina Cristian Fabian MsC.

**ABSTRACT**

Currently, microgeneration projects have been developed, especially where due to their geographical conditions prevent access to electricity supply by distribution companies, thus contributing to renewable energy sources use. At present project, the house located in Guadalupe neighborhood lacks electricity supply, which by installing an electricity generation system will benefit the users residing in the house. The generation system consists of a 25-liter reservoir, a low-power Turgo turbine, a single-phase generator that helps to convert mechanical energy into electrical energy, and a control system to verify generation parameters. After conducting field inspection and knowing the place where the main component and water resource that will be collected, it is proceeded to make sizing calculations of the microgeneration system, where following values were obtained; a considerable flow of 5 lt/s with a height of 14m, which generates a pressure of 19.88 PSI, a 2" pipe was selected that supports up to 60 PSI, a Turgo turbine with an efficiency of 85%, the mathematical procedure for design consists of 12 blades, with an injector having an impulse force of 69.1 N, a maximum generated electrical power of 583W, according to losses an effective power of 400W is obtained, a 4-pole permanent magnet generator and a control system are considered.

**KEYWORDS:** Microgeneration; Turgo turbine; turbine blades; generator; control system; renewable energy; water resources.

Yo, Marcelo Pacheco Pruna con cédula de identidad número: 0502617350 Licenciado en Ciencias de la Educación mención Inglés con número de registro de la SENESCYT:1020-12-1169234; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE”** de: **Tapia Villamarin Antonio Agustin**, aspirante a Magister en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

Latacunga, noviembre, 22, 2022



Lic. Marcelo Pacheco Pruna  
**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS UTC**  
C.C.: 050261735-0



**INDICE GENERAL**

INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes.....	1
Planteamiento del Problema .....	2
Formulación del Problema.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos .....	3
Justificación.....	5
Hipótesis .....	5
CAPÍTULO I.....	6
1.1.    Antecedentes de la Investigación .....	6
1.2.    Marco Teórico .....	7
1.2.1.    Centrales hidroeléctricas.....	7
1.2.1.1.    Origen de las centrales hidroeléctricas.....	7
1.2.1.2.    Definición de centrales hidroeléctricas .....	7
1.2.1.3.    Construcción general de una central hidráulica .....	8
1.2.1.4.    Clasificación de las centrales hidráulicas.....	8
1.2.1.5.    Centrales de agua corriente .....	8
1.2.1.6.    Centrales embalsadas .....	9
1.2.1.7.    Centrales Mixtas.....	10
1.2.1.8.    Otras .....	10
1.2.1.9.    Aprovechamiento de un río en uno o varios escalones .....	10
1.2.1.10.    Aprovecho simultaneo de un río y sus afluentes .....	11
1.2.2.    Picos centrales hidroeléctricas.....	11
1.2.2.1.    Componentes de un sistema de pico-generación.....	13
1.2.3.    MÁQUINAS HIDRÁULICAS.....	22

1.2.3.1.	Clasificación de las maquinas hidráulicas.....	23
1.2.3.2.	Máquinas de desplazamiento positivo.....	23
1.2.3.3.	Turbomáquinas.....	23
1.2.3.4.	Turbinas hidráulicas .....	23
1.2.3.5.	Tipos de turbinas .....	25
1.2.3.6.	Clasificación de acuerdo al tamaño o capacidad de generación de energía eléctrica de la turbina.....	27
1.2.4.	Turbina Turgo.....	27
1.2.5.	Partes de una turbina Turgo.....	30
1.2.5.1.	Rodete.....	30
1.2.5.2.	Distribuidor .....	31
1.2.5.3.	Álabes.....	31
1.2.5.4.	Eje.....	32
1.2.5.5.	Inyectores .....	33
1.2.6.	Principio de funcionamiento.....	33
1.2.7.	Generador Eléctrico.....	37
1.2.7.1.	Principio de funcionamiento de un generado.....	38
1.2.7.2.	Clasificación de los generadores .....	38
1.2.7.3.	Generador síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) .....	39
1.2.8.	Calidad de energía .....	40
1.2.8.1.	Voltaje.....	40
1.2.9.	Zonas de seguridad de operación del generador síncrono.....	40
1.2.10.	Potencia mínima de la turbina.....	41
1.2.11.	Potencia máxima de la turbina.....	41
1.2.12.	Limite por corriente mínima de excitación.....	41
1.3.	METODOLOGÍA.....	42

1.3.1.	Investigación Bibliográfica.....	42
1.3.2.	Investigación Descriptiva .....	42
1.3.3.	Investigación Experimental .....	42
1.3.4.	Métodos de Investigación.....	43
1.3.4.1.	Método Científico .....	43
1.3.4.2.	Método Deductivo.....	43
1.3.4.3.	Método Cuantitativo.....	43
1.4.	Investigación Experimental .....	43
1.5.	Técnicas e Instrumentos .....	44
1.5.1.	Técnicas.....	44
1.5.1.1.	Lectura Comprensiva .....	44
1.5.1.2.	Software .....	44
1.5.2.	Instrumentos .....	44
1.6.	Conclusiones.....	44
CAPÍTULO II.....		45
PROPUESTA .....		45
2.1.	Objetivo del proyecto .....	45
2.2.	Justificación de la propuesta.....	45
2.3.	Fundamentación de la propuesta .....	45
2.4.	Metodología o procedimientos empleados para el procedimiento de los objetivos planteados .....	45
2.4.1.	Requerimientos.....	46
2.4.1.1.	Caudal de Agua .....	46
2.4.1.2.	Selección de la turbina hidráulica .....	46
2.4.1.3.	Monitoreo de los parámetros de generación .....	46
2.4.2.	Equipos .....	46
2.4.2.1.	Turbina hidráulica .....	46

2.4.2.2.	Generador .....	46
2.4.2.3.	Cables .....	46
2.4.2.4.	Protección termomagnética .....	47
2.4.2.5.	SENTRON PAC 3220 .....	47
2.4.2.6.	Panel de control .....	48
2.4.3.	Diseño del sistema de pico-generación hidráulica .....	49
2.4.3.1.	Análisis del potencial hídrico .....	49
2.4.3.2.	Presión nominal .....	49
2.4.3.3.	Potencia neta estimada .....	49
2.4.3.4.	Tubería de presión .....	49
2.4.3.5.	Material de la tubería .....	50
2.4.3.6.	Perdidas en la tubería .....	50
2.4.3.7.	Golpe de ariete .....	50
2.4.3.8.	Turbina .....	50
2.4.3.9.	Generador eléctrico .....	53
2.4.4.	Velocidad de rotación del generador .....	55
2.4.5.	Dimensionamiento de los elementos del sistema de control .....	55
2.4.5.1.	Cálculo del interruptor termomagnético .....	55
2.4.5.2.	Cálculo de conductor eléctrico hacer utilizado .....	55
2.4.6.	Caída de tensión .....	56
2.4.7.	Sistema de puesta a tierra .....	57
2.4.8.	Conclusiones .....	57
CAPÍTULO III	.....	58
3.1.	Análisis de resultados .....	58
3.2.	Validación técnica-económica de resultados .....	62
3.3.	Evaluación de impacto de resultados .....	63
3.3.1.	Impacto Social .....	63

3.3.2. Impacto Tecnológico .....	63
3.3.3. Impacto Ambiental .....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	64
Conclusiones.....	64
Recomendaciones .....	64
BIBLIOGRAFÍA .....	65
ANEXOS .....	69



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Centrales con embalse.....	9
Figura 1.2. Clasificación de la energía eléctrica.....	11
Figura 1.3. Sistema de control.....	14
Tabla 1.2. Valores de elasticidad de conducción.....	18
Figura 1.3. Coeficientes C y K. ....	19
Figura 1.4. Densidad de potencia de varias micro turbinas.....	22
Figura 1.5. Rango de operación de las turbinas.....	24
Figura 1.6. Diagrama de bloques de un sistema de control de velocidad de turbina hidráulica. .....	24
Figura 1.7. Tipos de turbinas.....	25
Figura 1.7. Turbina Turgo. ....	28
Figura 1.8. Turbina Turgo. ....	29
Figura 1.9. Resultados de las pruebas del diseño de Crewdson Turgo de 1920 realizadas en Afon Calettwr .....	29
Figura 1.10. Eficiencia y rendimiento para un Turgo de 24 pulgadas. de diámetro medio bajo una carga de 750 pies.....	30
Figura 1.11. Rodete de una turbina Turgo.....	31
Figura 1.12. Distribuidor de una turbina Turgo.....	31
Figura 1.13. Forma de los álabes de una turbina Turgo. ....	32
Figura 1.14. Sistema de eje horizontal de una turbina Turgo.....	32
Figura 1.15. Diagrama del inyector de la turbina Turgo. ....	33
Figura 1.16. Triangulo de velocidades de un solo alabe de una turbina Turgo.....	34
Figura 1.17. Ángulo $\alpha_1$ en relación a la velocidad.....	35
Figura 1.18. Dimensiones recomendadas en función del diámetro del inyector. ....	37
Figura 1.19. Generador síncrono con un convertidor electrónico de potencia como interfaz con la red. ....	40

Figura 1.20. Curva de operación de un generador síncrono.....	42
Figura 2.1. Conductores eléctricos. ....	47
Figura 2.2. Interruptor termomagnético. ....	47
Figura 2.3. SENTRON PAC 3220.....	48
Figura 2.4. Tipo de conexión 1P2W, para sistemas monofásicos. ....	48
Figura 2.5. Panel de control del sistema de pico-generación. ....	48
Figura 2.6. Curva de operación del generador síncrono.....	54
Figura 2.7. Datos obtenidos de la simulación.....	54
Figura 3.1. Velocidad de chorro y flujo de caudal de agua VS Presión de la tubería. ....	59
Figura 3.2. Potencia Mecánica y Potencia Eléctrica VS Presión de la tubería.....	59
Figura 3.3. Potencia eléctrica vs caudal de agua. ....	60
Figura 3.4. Curva de eficiencia vs potencia.....	60
Figura 3.5. Curva de frecuencia vs carga. ....	61
Figura 3.6. Curva de voltaje vs carga. ....	61

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos, actividades.....	4
Tabla 1.1. Tuberías de presión.....	15
Tabla 1.3. Coeficiente K.....	19
Tabla 1.4. Coeficiente C.....	20
Tabla 1.5. Velocidad específica y eficiencia de las microturbinas.....	22
Tabla 1.6. Ventajas y desventajas de las turbinas de acción. ....	25
Tabla 1.7. Ventajas y desventajas de las turbinas de reacción. ....	26
Tabla 1.8. Medidas del alabe de la turbina Turgo .....	37
Tabla 1.9. Eficiencia para generadores PMSG.....	40
Tabla 1.10. COLELEC 004/01 Límites admitidos al valor de voltaje nominal. ....	40
Tabla 2.1. Medición del caudal de agua .....	49
Tabla 2.2. Valores obtenidos para el chorro del alabe.....	51
Tabla 2.3. Datos obtenidos para el inyector .....	52
Tabla 2.4. Parámetros generados por la turbina Turgo.....	53
Tabla 2.5. Datos del generador síncrono monofásico de imanes permanentes. ....	53
Tabla 2.6. Diámetro de conductores eléctricos AWG.....	56
Tabla 3.1. Gastos directos.....	62
Tabla 3.2. Gastos directos.....	62
Tabla 3.3. Cálculo de la depreciación.....	62

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el desarrollo de energía con fuentes renovables convencionales y no convencionales, es la consecuencia de observación al tema energético desde la perspectiva de la sustentabilidad energética. Los responsables de energía y medioambiente tienen un papel fundamental en la difusión y acercamiento de la tecnología a la población.

La investigación fue desarrollada en cuatro capítulos; tales como:

El capítulo I, se presenta los aspectos generales de la investigación, como son los antecedentes, planteamiento y formulación del problema de investigación, los objetivos, sistema de tareas en función de los objetivos específicos, justificación e hipótesis.

En el capítulo II, se encuentra el marco teórico referencial de la investigación desarrollada, con sus bases teóricas y también contiene los aspectos metodológicos de la investigación.

El capítulo III, presenta el desarrollo de la propuesta planteada, diseño y construcción del tema de investigación propuesto.

Finalmente se presenta las conclusiones, recomendaciones, la bibliografía y anexos.

### **Antecedentes**

Según el artículo técnico “Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present” se define como la turbina Turgo proporciona una solución única y novedosa para aumentar la capacidad de una turbina de impulso hidráulico mientras se mantiene el sistema de boquilla e inyector de lanza (como se usa en las turbinas Pelton) para la regulación del flujo. Esto ha producido una turbina que opera en los rangos de flujo más altos generalmente reservados para las máquinas Francis mientras mantiene una curva de eficiencia relativamente plana, característica de las máquinas de impulso. Esta turbina es la opción más rentable en lo que ha generación de energía eléctrica a pequeña escala se refiere, debido a que puede operar en un rango extendido de caudal, [1].

El paper “An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response Surface methodology” indica la construcción una micro central hidroeléctrica con una turbina Turgo utilizando materiales de bajo costo. Donde este estudio

fue un diseño empírico, la cual permita a personas interesadas en la generación de energía eléctrica mediante una turbina tipo Turgo de bajo costo, [2].

En el artículo técnico “Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis”, presenta para la selección del tipo de turbina que se puede emplear dentro de un sistema de microgeneración eléctrica, por medio de cálculos cualitativos y cuantitativos, para su selección. Especificando el modelo de la turbina, cada turbina tendrá un conjunto de requerimientos y especificaciones que se desarrolla a través de las decisiones del proyecto, [3].

En el Ecuador existen poblaciones las cuales están aisladas de la red de suministro eléctrico, por su situación geográfica tienen una gran afluencia de agua, en algunos lugares existen puntos turísticos, la cual necesitan energía eléctrica para su consumo, para la obtención de energía eléctrica diseñan pequeñas centrales de generación hidráulica por las grandes caídas de agua que existen en dichas áreas y son aprovechadas para ir mejorando su modo de vida.

### **Planteamiento del Problema**

En el artículo 53 del Reglamento General de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico, establece que la operación de las centrales de generación que utilicen fuentes no convencionales se sujetase a reglamentaciones específicas dictadas por el CONELEC.

La regulación del CONELEC N°.001-13., indica en el artículo 63 en la Ley de Régimen del sector Eléctrico, establece que el estado fomentara el desarrollo y uso de los recursos energéticos no convencionales a través de los organismos públicos, la banca de desarrollo, las universidades y las instituciones.

La instalación de un sistema de microgeneración, con el fin de proporcionar un suministro energético a viviendas que se encuentran aisladas de la red principal de energía eléctrica. Con el aprovechamiento del recurso hídrico existente, se instala una turbina hidráulica de baja potencia para la generación de energía eléctrica, siendo una fuente de energía renovable no convencional.

### **Formulación del Problema**

La falta de acceso de la energía produce graves consecuencias en el desarrollo de los países menos adelantados, la energía eléctrica hoy en día se ha caracterizado en ser el elemento fundamental para el desarrollo productivo en el cambio de la matriz energética, el cual en la provincia de Cotopaxi cantón Latacunga, no ha sido la excepción; aún existen dificultades en el sistema de distribución en los sectores rurales donde poco o nada ha hecho los gobiernos de turno en brindar este servicio que es básico para el desarrollo de las sociedades.

### **Objetivo General**

Implementar un sistema de generación hidráulica mediante una turbina de baja potencia, para garantizar el suministro eléctrico de una vivienda ubicada en el Barrio Guadalupe.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar los tipos de turbinas de baja potencia para pico centrales hidroeléctricas en función a su presión o su caudal.
- Diseñar un sistema de pico generación eléctrica a partir de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, acorde al recurso energético disponible.
- Implementar un sistema de microgeneración.
- Interpretar de forma técnica y económica la propuesta planteada.

### **Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos**

Con el fin de lograr el cumplimiento de todos los objetivos planteados en la Tabla 1., tal cual se especifica las actividades y resultados obtenidos.

**Tabla 1.** Objetivos, actividades.

<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Actividad</b>	<b>Resultado de la Actividad</b>	<b>Descripción de la Actividad</b>
<b>Caracterizar los tipos de turbinas de baja potencia para pico centrales hidroeléctricas en función a su presión o su caudal.</b>	<p>Revisión de información bibliográfica referente a las turbinas de baja potencia.</p> <p>Determinación de los tipos de turbinas que son utilizadas en centrales de baja potencia.</p>	<p>La información permitirá realizar una redacción técnica científica y a la vez verificada por el uso de referencias bibliográficas ubicadas en un marco teórico.</p>	<p>Revisión y previsión de información mediante el uso de internet en el cual se ubicarán libros, artículos, foros y todo implemento que haya sometido a investigación.</p>
<b>Diseñar un sistema de pico generación a partir de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, acorde al recurso energético disponible.</b>	<p>Selección de la turbina hidráulica a ser implementada.</p> <p>Selección de la capacidad del generador.</p>	<p>Dimensionar los equipos tanto mecánicos y eléctricos para su instalación.</p>	<p>Manejo de una computadora portátil con acceso a internet para conocer las características de operación de la turbina y generador.</p> <p>Cálculos matemáticos para su dimensión.</p> <p>Software de cálculo.</p> <p>Software para diseño.</p>
<b>Implementar un sistema de microgeneración.</b>	<p>Instalación del generador y la turbina.</p> <p>Conexión del tablero</p>	<p>Generación de energía eléctrica.</p> <p>Elaboración del plano de instalación</p>	<p>Herramientas de plomería, tubería y dispositivos eléctricos.</p> <p>Dispositivos</p>

	de control.	de la central.	electrónicos de medición de voltaje, corriente.
<b>Interpretar de forma técnica y económica la propuesta planteada.</b>	Revisión de costos de materiales que serán utilizados. Revisión de la hoja de datos de cada equipo.	Análisis económico para determinar el costo total para la factibilidad de la propuesta.	Utilización del software Excel. Utilización de ecuaciones.

**Fuente:** Antonio Tapia

### **Justificación**

Aprovechando el recurso energético disponible, se plantea la implementación de un sistema de pico generación eléctrica en función de mejorar la calidad de vida de las personas del sector que no cuentan con un suministro energético para realizar las actividades cotidianas en la vivienda.

El uso de las turbinas de baja potencia favorece a viviendas rurales que no cuentan con energía eléctrica, en especial a los agricultores ayudando al desarrollo de una producción más tecnificada.

### **Hipótesis**

La implementación de un sistema de pico generación hidráulica permitirá dotar de suministro energético para las personas del barrio Guadalupe.



## CAPÍTULO I

### 1. FUNDAMENTACIÓN TEORICA - METODOLOGÍA

#### 1.1. Antecedentes de la Investigación

Los antiguos romanos y griegos aprovechaban ya la energía del agua; utilizaban ruedas hidráulicas para moler trigo. Sin embargo, la posibilidad de emplear esclavos y animales de carga retrasó su aplicación generalizada hasta el siglo XII. Durante la edad media, las grandes ruedas hidráulicas de madera desarrollaban una potencia máxima de cincuenta caballos. La energía hidroeléctrica debe su mayor desarrollo al ingeniero civil británico John Smeaton, que construyó por vez primera grandes ruedas hidráulicas de hierro colado. La hidroelectricidad tuvo mucha importancia durante la Revolución Industrial. Impulsó las industrias textiles y del cuero y los talleres de construcción de máquinas a principios del siglo XIX. Aunque las máquinas de vapor ya estaban perfeccionadas, el carbón era escaso y la madera poco satisfactoria como combustible. La energía hidráulica ayudó al crecimiento de las nuevas ciudades industriales que se crearon en Europa y América hasta la construcción de canales a mediados del siglo XIX, que proporcionaron carbón a bajo precio. Las presas y los canales eran necesarios para la instalación de ruedas hidráulicas sucesivas cuando el desnivel era mayor de cinco metros. La construcción de grandes presas de contención todavía no era posible; el bajo caudal de agua durante el verano y el otoño, unido a las heladas en invierno, obligaron a sustituir las ruedas hidráulicas por máquinas de vapor en cuanto se pudo disponer de carbón, [4].

El 70 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, en la que el 97% de este porcentaje es de agua salada y el resto 3% es agua dulce. Las aguas superficiales que incluyen los ríos, lagos y pantanos representan el 0,3% del agua dulce. Aunque el porcentaje parece ser pequeño, pero las aguas superficiales, especialmente los ríos, juegan un papel importante como fuente de agua utilizada todos los días. Además de ser el medio de transporte, riego para la agricultura, minería y recreación, el río también es un medio adecuado para la generación de energía hidroeléctrica, [5].

La electricidad producida por pico hidro es útil en comunidades pequeñas y remotas que requieren solo una pequeña cantidad de electricidad, por ejemplo, para alimentar una o dos bombillas fluorescentes y un televisor o radio en 50 hogares, [5].

Las centrales hidroeléctricas forman parte de la categoría más pequeña de generación de energía hidroeléctrica, que se refiere a esquemas con potencias nominal inferior a 5 kW. Dichos sistemas generalmente abastecen áreas remotas y fuera de la red y proporcionan electricidad a comunidades rurales e industrias de pequeña escala. Por lo general son esquemas de “pasada”, lo que significa que no requieren la construcción de una presa ni detienen el flujo del río, sino que desvían una parte del flujo hacia un canal o tubería y luego a través de la turbina. Estos sistemas constituyen una de las soluciones de energía renovable más rentables debido a sus pequeños requerimientos de capital inicial y principalmente debido a su operación continua, produciendo potencia nominal las 24 horas del día y los 7 días de la semana, [6].

Las componentes principales de una pico-hidráulica son la toma, el tanque de la cámara de carga, la tubería de la compuerta que alimenta a la turbina hidráulica con agua a través de las boquillas y suministra la energía mecánica requerida al generador, [6].

Las turbinas hidro-cinéticas son un tipo de turbinas hidráulicas, pero con cero caídas, las cuales usan la energía de la corriente del agua para generar energía. Estas operan con muchos principios similares igual a las turbinas de viento y comparten un diseño similar, [7].

## **1.2. Marco Teórico**

### **1.2.1. Centrales hidroeléctricas**

#### **1.2.1.1. Origen de las centrales hidroeléctricas**

Utilización de la energía del agua proveniente del ciclo hidrológico. Entre las formas de energía que posee el agua tenemos: Energía cinética ( $E_c$ ) → aprovechar la velocidad de la misma y la Energía potencial ( $E_p$ ) → elevación del agua en este caso se refiere a la explotación de esta energía entre dos puntos de diferente altura, [8].

#### **1.2.1.2. Definición de centrales hidroeléctricas**

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que permiten aprovechar la energía potencial gravitatoria (masa a una cierta altura) contenida en el agua de los ríos, al convertirla en energía eléctrica mediante turbinas hidráulicas acopladas a generadores eléctricos, [9].

Para generar esta caída del agua desde un nivel alto es necesario la creación de un embalse, que generalmente se construye a modo de cortina en un río.

Las centrales hidroeléctricas producen energía eléctrica a partir de la energía potencial o gravitatoria (masa a una cierta altura) contenida en el agua de los ríos, mediante el equipo turbina-generator, [10].

### **1.2.1.3. Construcción general de una central hidráulica**

La afluencia de agua sobre la superficie terrestre que corre a través de ríos, la cual tiene una energía cinética la que depende de la velocidad del agua, a su vez en función de la pendiente y la rugosidad del cruce. El caudal de agua puede ser dividido por un canal lateral generando una menor rugosidad. en un punto apropiado se puede pasar el caudal de agua por maquinas motrices hidráulicas, que transforma la energía potencial del agua en energía y esta es devuelta al rio.

### **1.2.1.4. Clasificación de las centrales hidráulicas**

Los tipos de centrales hidráulicas son varias ya que depende de la construcción la situación del rio, cuya energía puede ser aprovechada: las cuales se clasifican en:

- a) Centrales de alta presión. – una altura de salto hidráulico superior a 200 m.
- b) Centrales de media presión. – comprende una altura de salto hidráulico de 20 a 200 m.
- c) Centrales de baja presión. – con una altura de salto hidráulico inferior a 20 m.

### **1.2.1.5. Centrales de agua corriente**

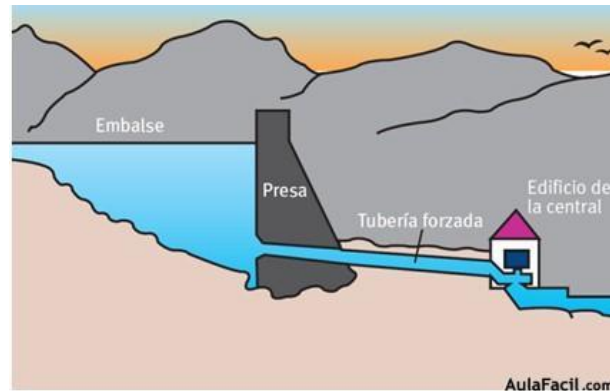
Se constituye en sitios que la energía hidráulica puede ser utilizada directamente para la turbina de tal forma de no existir la central, esta energía se desperdiciaría. El caudal de un rio es variable, en los años de sequía y en años de abundancia de agua. Esta central se puede construir para el mínimo de caudal, el exceso es desaprovechado, al construirse en caudal de abundancia de agua al haber la temporada de sequía trabaja a menor carga y por lo tanto su rendimiento es bajo.

Estas centrales disponen de un azud (pequeño muro transversal al cruce de rio o canal) para elevar el nivel de agua, que permite tomar el caudal que va hacer turbinado. Tiene dos configuraciones:

- Central ubicada directamente en el azud
- Central con canal de derivación

### 1.2.1.6. Centrales embalsadas

Se construye un embalse o es pantano la cual almacena el agua, la cual es aprovechada según las necesidades, en el embalse siempre se considera una presa la cual tiene que estar en lugares apropiados del río, en lugares angostos y rocosos para evitar colapsos.



**Figura 1.1.** Centrales con embalse.

Los elementos que componen una central embalsada:

- Presa
- Canal de derivación
- Cámara de presión
- Tubería de presión
- Central
- Tubería de desagüe
- Parque de distribución a alta tensión

Este tipo de central con presa constituye central de bombeo o centrales reversibles. Estas centrales poseen una o varias turbinas a lo mismo de varias bombas. Consta de dos embalses aguas arriba de la central y aguas abajo.

Su función es simple, cuando existe alta demanda energética trabajan como centrales turbinando el agua, al existir baja demanda energética, funciona bombeando el agua del embalse inferior al embalse superior, asegurando de esta forma turbinar cuando la demanda de energía lo requiere.

### 1.2.1.7. Centrales Mixtas

Estas centrales disponen de un pequeño embalse de captación de agua, la cual no tiene capacidad de regulación, estas centrales pueden decidir en qué momento turbinan el agua, pero no pueden estar más de un día sin perder agua.

Estos tipos de centrales generalmente se encuentran ubicadas:

- Zonas montañosas: captan en embalse aguas de las lluvias o deshielos.

Es similar a las centrales de agua corrida, sustituye el azud por un pequeño embalse, en ocasiones es un depósito de grandes proporciones.

### 1.2.1.8. Otras

En las centrales existen dos subgrupos:

- a) Microcentrales (<100 kW)

En centrales menores a 100 kW, se puede encontrar centrales desde 50 W.

Son aquellas instalaciones que satisfacen las necesidades de núcleos aislados tales como granjas, chalets o similares, por lo tanto, tienen una necesidad de regulación específica.

Existen múltiples instalaciones conectadas a la red. Suelen ser pequeñas rehabilitaciones con pequeños saltos utilizados previamente como molinos ubicados en canales de riego.

- b) Centrales en circuitos de agua potable

En ciertos ramales de agua potable, el desnivel existente entre el área urbana e industrial que lo aprovecha es muy elevado, en este caso es necesario instalar válvulas de disipación energética cuya misión es reducir la presión de los ramales, para que llegue al usuario final una presión adecuada.

### 1.2.1.9. Aprovechamiento de un río en uno o varios escalones

En el largo de un río se debe estudiar su aprovechamiento si es beneficioso el desnivel para instalar una sola central o varias centrales. En el punto de vista de la construcción lo más apropiado es realizar una sola central, por la economía los gastos de explotación, el mercado de consumo es necesario para su disposición en breve tiempo, toda la energía que es capaz de producir en el aprovechamiento hidroeléctrico.

### 1.2.1.10. Aprovecho simultaneo de un rio y sus afluentes

Cuando se trata de aprovechar el tramo de un rio, confluyen varios afluentes en el aprovechamiento global con lo que se tiene un mayor rendimiento conjunto.

Un rio con varios afluentes y distintos saltos de agua puede tener sus propias instalaciones de canales, cámaras de presión, tubería forzada.

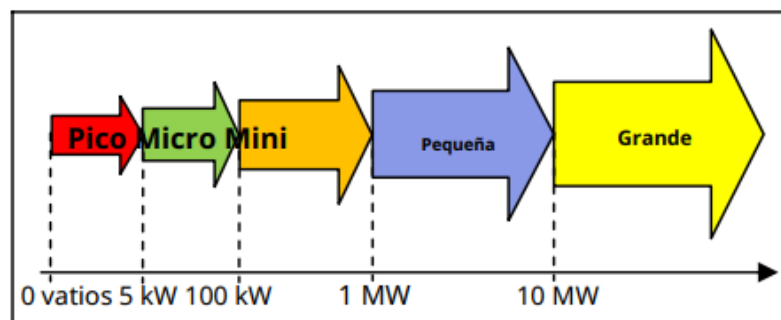
### 1.2.2. Picos centrales hidroeléctricas

En la actualidad la energía eléctrica generada es de origen hidroeléctrico, la cual ayuda a la conservación del medioambiente, logrando evitar el uso de otras fuentes de energía que contaminan en ambiente. Aun así, la energía hidráulica tiene sus desventajas con el impacto de la obra civil, la que genera por la construcción de los embalses debido a las grandes centrales, provocando inundaciones en grandes áreas para poder aprovechar el recurso hídrico.

El aprovechamiento de energía, con una potencia instalada inferior a 10 MW, son amigables con el medioambiente ya que no necesita construcción de grandes embalses o presas, siendo estas pequeñas centrales que en su mayoría son utilizadas de agua fluyente.

Las pico-hidroeléctricas es la energía generada por turbinas de una potencia no mayor a 5 KW, este tipo de centrales permite el aprovechamiento de pequeñas fuentes de agua, como riachuelos que logran suministrar energía a pequeñas viviendas en zonas rurales.

Las pico-hidroeléctricas es uno de los miembros de la familia hidroeléctrica, o más precisamente; es uno de los subconjuntos de la familia hidroeléctrica. La figura 1.2, muestra la familia hidroeléctrica (de pico a gran hidroeléctrica) según la capacidad de producción de energía eléctrica, [5].



**Figura 1.2.** Clasificación de la energía eléctrica.

**Fuente:** [5]

Una instalación típica de una pico-hidro consta de los siguientes componentes:

- Bocatomas y reservorio: toma de agua de un riachuelo y manteniendo una reserva de agua.
- Tubería descendente: transporta el agua hasta la turbina.
- Turbina y generador: el agua sale por el inyector, esta golpea a la turbina haciendo girar, generando una potencia mecánica, debido a la rotación de la turbina se convierte en energía eléctrica.
- Controlador de potencia eléctrica: hace que la potencia generada por el generador sea transmitida a las cargas eléctricas de consumo.
- Sistema de distribución: se distribuye la energía eléctrica por toda la vivienda.

### **Ventajas de las centrales y pico centrales hidroeléctricas (potencias > 10 kW)**

Las ventajas de las centrales y pico centrales son, [11]:

- Es renovable.
- No se consume. Se toma de un punto y se devuelve a otro a una cota inferior.
- Es segura para personas animales o bienes.
- No genera calor ni emisiones contaminantes. (lluvia ácida, efecto invernadero)
- Genera puestos de trabajo en su construcción, mantenimiento y operación.
- Requiere inversiones muy cuantiosas que se realizan normalmente en regiones de montaña muy deprimidas económicamente.
- Genera experiencia y tecnología fácilmente exportables a países en vía de desarrollo.

### **Inconvenientes de las centrales hidroeléctricas convencionales (potencia > 10 kW)**

Las desventajas de las centrales hidroeléctricas son, [11]:

- Altera el normal desenvolvimiento en la vida biológica (animal y vegetal) del río.
- Las centrales de embalse tienen el problema de la evaporación del agua: en las zonas donde se construye aumenta la humedad relativa del ambiente como consecuencia de la evaporación del agua contenida en el embalse.
- En el caso de las centrales de embalse construidas en regiones tropicales, estudios realizados han indicado que generan, como consecuencia del estancamiento de las aguas, grandes focos infecciosos de bacterias y enfermedades. Los sedimentos se

acumulan en el embalse empobreciéndose de nutrientes el resto del río hasta su desembocadura.

- Además, genera desplazamiento de las comunidades que habitan en las tierras que van a ser embalsadas.

### **Inconvenientes medioambientales de las pequeñas centrales hidráulicas (potencia < 10 kW)**

Los inconvenientes de las pequeñas centrales hidroeléctricas son, [11]:

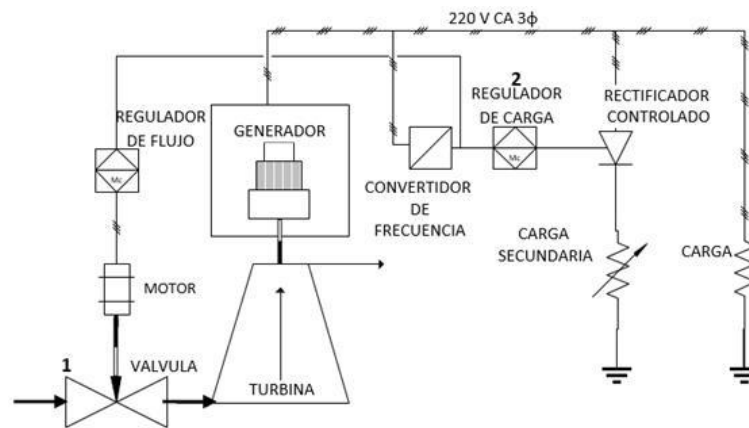
- Impacto medioambiental mínimo.
- La incidencia visual es baja.
- Los ruidos son los ambientales.
- No genera calor ni emisiones contaminantes (lluvia ácida, efecto invernadero, etc.).
- No afecta a la vegetación.
- El impacto se puede reducir mediante escalas para peces, caudal ecológico, soterramiento de canales de derivación, tuberías forzadas, repoblación arbórea, etc.
- Genera experiencia y tecnología fácilmente exportables a países en vías de desarrollo.

#### **1.2.2.1. Componentes de un sistema de pico-generación**

En la actualidad los sistemas de pico-generación están compuestos de varios componentes, las cuales incluyen componentes básicos como es la turbina y el generador. Una central hidroeléctrica necesita su recurso hidráulico con una caída mínima de origen y el sitio donde va hacer la conversión de energía, su transporte de caudal va ser por medio de tubería.

Los pocos componentes que lleva la pico-generación, su funcionamiento es la misma que una central de gran potencia. La energía potencial del agua se transforma en energía cinética por medio de una tubería de presión. La energía hidráulica es convertida por una turbina la que es transmitida mediante un eje, al generador eléctrico, al final la energía mecánica producida por la turbina se convierte en energía eléctrica. Al final de todo este proceso es controlado de forma autónoma, por medio de un limitado número de mecanismos de monitoreo y control.





**Figura 1.3.** Sistema de control.

**Fuente:** [12]

### 1.2.2.1.1. Bocatomas

La obra civil su función es captar el caudal proveniente de canales:

- Caudal constante.
- Evitar el ingreso de escombros.
- Protección del embalse en épocas de lluvia.

### 1.2.2.1.2. Tubería de presión o forzada

El transporte del agua, por medio de tubería la cual se genera una presión desde las bocatomas hasta la turbina.

Selección de la tubería

- Tipo de material: PVC (policloruro de vinilo), hierro, acero, cemento.
- Perdida de fricción por el tipo de material utilizado.
- Golpe de ariete por un cierre brusco del distribuidor.
- Selección del diámetro correcto a menor costo y con menores pérdidas.
- Dificultad en la instalación y en su mantenimiento.

La ecuación 1 establece la presión de trabajo de la tubería:

$$P = \rho * g * h$$

*Ecuación 1.1*

Donde:

P= presión nominal del sistema (Pascuales)

$\rho$  = densidad del fluido  $1000 \text{ kg/m}^3$

$g$  = aceleración de la gravedad  $9.81 \text{ m/s}^2$

$h$  = altura de salto de agua (m)

Para la selección de la tubería disponible en el mercado, observe la siguiente tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Tuberías de presión.

**COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES MATERIALES PARA TUBERÍAS**

Material	Perdida por fricción	Peso	Corrosión	Costo	Presión de trabajo
Hierro dúctil	4	3	2	1	5
Asbesto	3	3	4	4	4
Cemento					
PVC	5	5	4	4	4
Acero comercial	3	3	3	2	5
Poliestirenos	5	5	5	3	4

Tabla 1.1. Los valores observados en la tabla, la cual comprende las características de las tuberías van de 1 como malo y 5 como excelente.

**Fuente:** [13]

Es importante considerar las pérdidas en la tubería en el diagrama de Moody, identifica las pérdidas por fricción de la tubería, observe el Anexo 1. La cual se encuentra el valor de fricción ( $f$ ), la rugosidad ( $k_r$ ), la relación de rugosidad ( $k$ ), y su diámetro interno de la tubería ( $d$ ), véase la ecuación 2.

$$K_r = k/d \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Se logra calcular la pérdida por fricción en la tubería con la ecuación siguiente:

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot Q^2}{d^5} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

$L$  = longitud de la tubería (m)

$Q =$  caudal ( $m^3/s$ )

El diagrama de Moddy ayuda al cálculo de las pérdidas por turbulencia, Anexo 1, se tiene que tener en cuenta las válvulas, los codos para determinar las pérdidas de turbulencia ( $h_t$ ).

$$k_t = \frac{v^2}{2g} (k_1 + k_2 + \dots + k_n) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

$V =$  velocidad de agua (m/s)

$g =$  gravedad ( $9,81 m/s^2$ )

$k_n =$  pérdidas en cada accesorio

Para el cálculo de las pérdidas totales se tiene que tener en cuenta la suma de las pérdidas por fricción y las pérdidas por turbulencia.

$$h_p = h_f + h_t \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Se tiene para el cálculo el porcentaje de pérdidas totales de la tubería y la altura neta.

$$p\% = \frac{h_p * 100}{H} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Para el cálculo del espesor de la tubería se tiene en cuenta la presión nominal, para que la tubería trabaje en condiciones normales.

$$\Delta h_{trans} = \frac{a * \Delta V}{g} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Es la velocidad de propagación de onda dependiendo del material.

La sobrepresión está en función de la altura neta teniendo una caída teórica.

$$h_t = \Delta h + h_p \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Para el espesor de la tubería (T) se tiene la siguiente ecuación:

$$T = \frac{5 * f_s * h_t * 10^6 * d * k_j}{s} + K_c \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde:

$f_s =$  factor de seguridad

S= esfuerzo de rotura del material ( $\frac{N}{m^2}$ )

$K_c$ = factor de corrosión, se considera una relación de 1mm por cada 10 años.

$K_j$ = factor de soldadura

### 1.2.2.1.3. Golpe de ariete

Este fenómeno se produce en los conductos al abrir y cerrar una válvula y al poner en marcha o parar una maquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal. Un caso importante ocurre en las centrales hidroeléctricas, donde se ha de reducir bruscamente el caudal de suministro a las turbinas hidráulicas acopladas a alternadores, cuando se anula la carga del alternador: en este caso la instalación debe proyectarse que la instalación no produzca golpe de ariete excesivo.

Se tiene que tener en cuenta la afectación del golpe de ariete, para que se mantenga constante el sistema hidráulico ante cualquier perturbación ya sea en el caudal o en la carga.

Frecuencia de propagación de onda de presión, se genera por una sobrepresión o depresión que se reemplaza de un extremo a otro en la instalación.

El periodo de frecuencia dependerá de la distancia que sea de conducción de la instalación y de su velocidad.

$$\frac{2*L}{a} \qquad \text{Ecuación 1.10}$$

Donde:

L= longitud total (m)

a= velocidad de conducción (m/s)

la velocidad de calcula con la siguiente expresión:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3+K*\frac{D}{e}}} \qquad \text{Ecuación 1.11}$$

Donde:

D= diámetro de conducción (mm)

e= espesor (mm)

K= coeficiente representativo de la elasticidad del material de la conducción ( $kg/m^2$ )

El módulo de elasticidad se calcula con la siguiente expresión:

$$K = 10^{10} / \varepsilon \quad \text{Ecuación 1.12}$$

$\varepsilon$ = modulo de elasticidad del material de conducción.

Los valores de referencia son los siguientes:

**Tabla 1.2.** Valores de elasticidad de conducción.

Material	$\varepsilon \left( \frac{kg}{m^2} \right)$
Fundición	$17 * 10^9$
Acero	$21 * 10^9$
Hormigón	$3 * 10^9$
PCV-U	$3 * 10^8$
PE	$10^8$
PRFV	$2 * 10^8$

**Fuente:** [14]

La siguiente característica que se tiene que analizar es el tiempo que dura la variación de la velocidad, es decir, el que transcurre desde el corte de energía y la anulación del caudal o el tiempo de parada de agua.

$$T = C + \frac{K * L * V}{g * H_m} \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Donde:

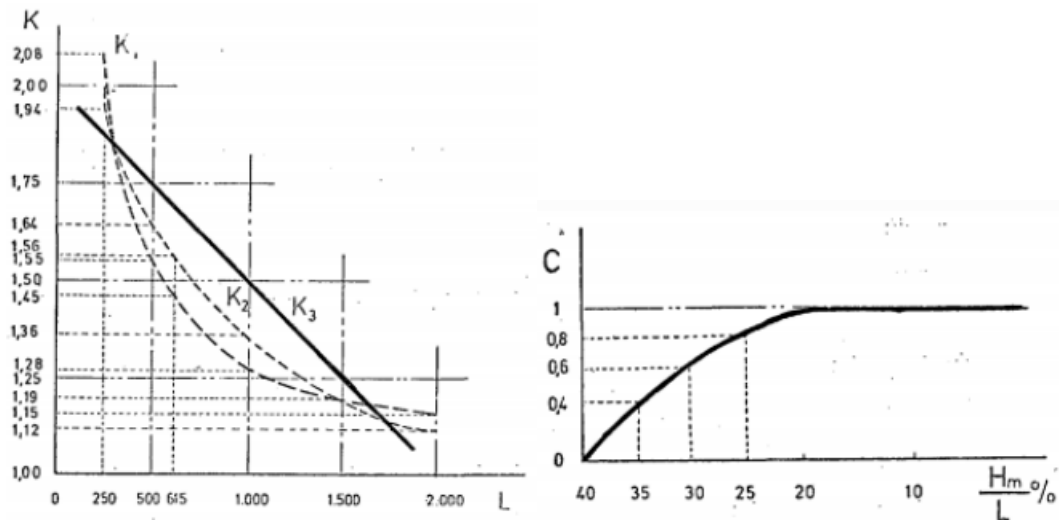
T= tiempo de parada de agua

$L$ = longitud de conducción de la instalación (m)

$V$ = velocidad de circulación de agua en la instalación (m/s)

$H_m$ = altura manométrica de la instalación

$C$  y  $K$ = coeficientes de ajuste



**Figura 1.3.** Coeficientes  $C$  y  $K$ .

**Fuente:** [14]

El coeficiente  $K$  representa la inercia del equipo de bombeo, en función de la cinética del agua.

**Tabla 1.3.** Coeficiente  $K$

$L(m)$	$K$
<b>&lt;500</b>	2
<b>≈ 500</b>	1,75
<b>500&lt;<math>L</math>&lt;1500</b>	1,5
<b>≈ 1500</b>	1,25
<b>&gt;1500</b>	1

**Fuente:** [14]

El coeficiente C supe el efecto de otras energías de cálculo, como la descompresión del agua. En función a la pendiente hidráulica, se consideran los siguientes valores.

**Tabla 1.4.** Coeficiente C

i	C
<20 %	1
≈ 25%	0,8
≈ 30%	0,6
≈ 40%	0,4
>50%	0

**Fuente:** [14]

La longitud critica de instalación, se relaciona con la velocidad de propagación de la onda y el tiempo de parada de agua.

$$L_c = \frac{a \cdot T}{2} \quad \text{Ecuación 1.14}$$

Donde:

$L_c$  = longitud critica

T= tiempo de parada (s)

a= velocidad (m/s)

Para los tiempos de parada o maniobras de cierre lentos o instalaciones cortas, para el cálculo del golpe de ariete y la obtención del incremento de presión producido es la propuesta por Michaud:

$$\text{Michaud } \Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T} \quad \text{Ecuación 1.15}$$

#### 1.2.2.1.4. Turbina

La misión de la turbina es la transformación de la energía potencial del agua en energía rotacional, esto se logra por la variación de la energía que el fluido pasa por las palas de la turbina.

$$\epsilon_T = \frac{\text{altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}} \quad \text{Ecuación 1.16}$$

El grado de reacción llega a ser 0 se conoce que es una turbina de acción. Si es diferente de 0 se conoce como una turbina de reacción.

Algunos aspectos de las turbinas se detallan en las tablas 1.6 y 1.7., todas estas características que se presentan en las tablas ayudan a la selección de la turbina, bajo las condiciones específicas en un sistema popular.

En la tabla 1.5, la relación de las microturbinas define los rangos de operación la velocidad específica y eficiencia.

$$N_s = N * \frac{\sqrt{P}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad \text{Ecuación 1.17}$$

Donde:

N= RPM

P= potencia esperada

H= altura neta

En la figura 1.5., las turbinas Turgo y Pelton son las más utilizadas en los rangos de acción con respecto a la altura neta, están en la misma área de acción de (5-100m).

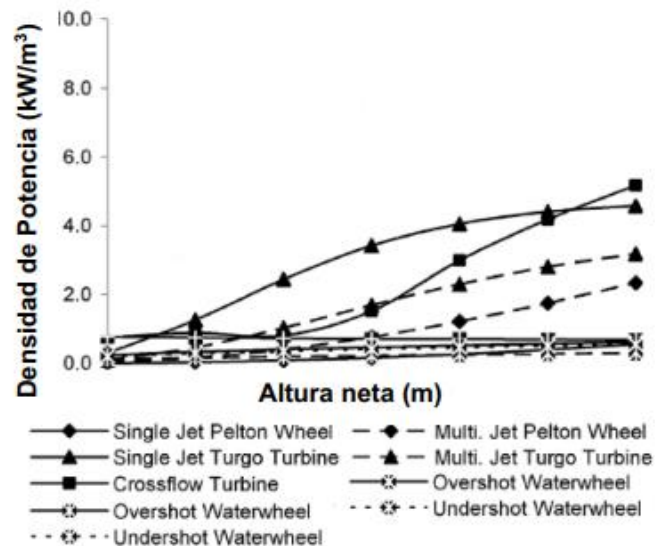
La relación de potencia hidráulica generada y la masa necesaria para el adecuado funcionamiento de una turbina hidráulica. En la figura 1.4, todas las turbinas de microgeneración en función de un parámetro conocido como densidad de potencia.



**Tabla 1.5.** Velocidad especifica y eficiencia de las microturbinas.

Tipo de turbina	Ns	Eficiencia $\eta$ máx. %
<b>Pelton de una tobera</b>	12-30	91
<b>Pelton de dos toberas</b>	14-40	86
<b>Turgo</b>	20-70	85
<b>Michell-Banki</b>	20-200	82
<b>Francis</b>	80-400	92
<b>Kaplan</b>	140-1000	93

**Fuente:** [15]



**Figura 1.4.** Densidad de potencia de varias micro turbinas.

**Fuente:** [16]

### 1.2.3. MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Son dispositivos mecánicos que manejan fluidos, tal que la densidad de los mismos se puede considerar que no varía sensiblemente a su paso por la maquina; por lo tanto, con fines de cálculo y diseño, pueden considerarse incomprensibles ( $\rho = cte.$ ). por ejemplo, las bombas, los ventiladores, las turbinas hidráulicas. En contraposición, si el fluido cambia sensiblemente el valor de su densidad a su paso por la máquina, estas máquinas ya no se denominan

hidráulicas sino máquinas térmicas. Por ejemplo, los turbocompresores, las turbinas de gas y las turbinas de vapor. En cualquier caso, ambas categorías de máquinas pertenecen a las llamadas máquinas de fluido.

### **1.2.3.1. Clasificación de las máquinas hidráulicas**

Las máquinas hidráulicas se clasifican en: máquinas de desplazamiento positivo y turbomáquinas.

### **1.2.3.2. Máquinas de desplazamiento positivo**

Son aquellas que el elemento intercambiador de energía cede su energía al fluido o viceversa en forma de energía presión creada por una variación de volumen. Los cambios de dirección del fluido y la magnitud de velocidad no tienen mayor importancia. Pertenecen a esta clasificación las máquinas de transmisión hidráulica y neumática, por ejemplo, las bombas de embolo, de engranajes, de platos, etc., y los cilindros hidráulicos y neumáticos.

### **1.2.3.3. Turbomáquinas**

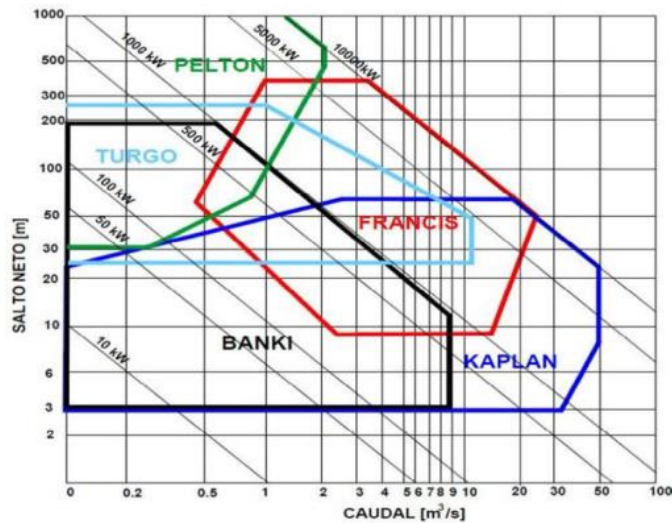
Las turbomáquinas son equipos diseñados para producir transferencia de energía entre un fluido y un eje de rotación, por medio del efecto dinámico que ejerce el fluido, al pasar por una o varias coronas de alabes (fijos y / o móviles). El nombre que recibe la corona fija y móvil es, respectivamente, rotor (llamado rodete, impulsor o hélice, según el tipo de máquina) y estator (voluta o carcasa, según el caso). Se diferencia de las máquinas de desplazamiento positivo en que el paso del fluido por la turbomáquina se realiza continuamente y, por tanto, el intercambio energético es continuo.

- Turbomáquinas generadoras: Son turbomáquinas que absorben energía mecánica y restituyen energía al fluido. Cuando el fluido que manejan es líquido, reciben el nombre de bombas; mientras que, si el fluido es grueso, reciben el nombre de ventiladores.
- Turbomáquinas motoras: Son turbomáquinas que absorben energía de fluido y restituyen energía mecánica. Se denominan, en general, turbinas independientemente del fluido que manejen.

### **1.2.3.4. Turbinas hidráulicas**

La turbina hidráulica es el principal componente de una PCH, responsable de transformar la energía cinética y potencial contenida en la caída de agua, en un movimiento rotacional que se transfiere al generador eléctrico. Existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas. Los criterios

más importantes a tener en cuenta para la selección del tipo de turbina óptimo de un proyecto dado, son las condiciones topográficas e hidrológicas del sitio. Las condiciones de mayor impacto sobre la selección son el caudal y la caída de agua disponible.

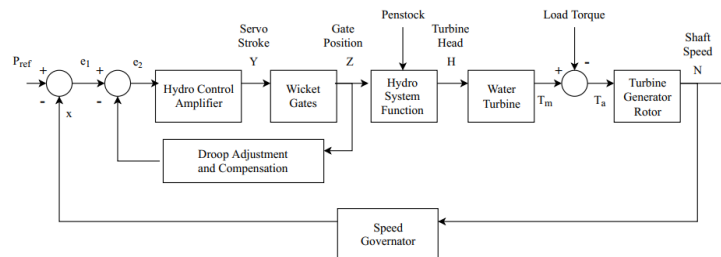


**Figura 1.5.** Rango de operación de las turbinas.

**Fuente:** [17]

Para un sistema aislado, un ejemplo de control electrónico aplicado en el eje de la turbina es la figura 1.6. La velocidad de la turbina está relacionada con una velocidad de referencia, o posición, y su error se trata con el par mecánico calculado. Posteriormente, se compara con la carga actual. Para los sistemas interconectados, la velocidad se mide de acuerdo con la carga predominante, [18].

Sin embargo, este tipo de control utiliza una técnica compleja y un mecanismo de alta inercia que adapta el flujo para adaptarse a las fluctuaciones en la demanda de energía, [19].

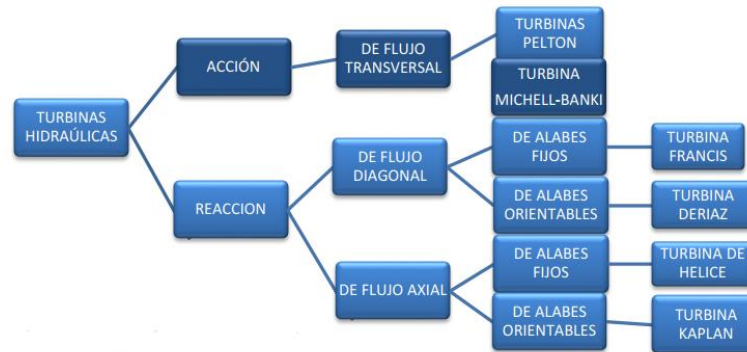


**Figura 1.6.** Diagrama de bloques de un sistema de control de velocidad de turbina hidráulica.

**Fuente:** [20]

### 1.2.3.5. Tipos de turbinas

Las turbinas pueden clasificarse en dos grandes grupos:



**Figura 1.7.** Tipos de turbinas.

**Fuente:** [11]

#### 1.2.3.5.1. Turbinas de acción o de impulso

Son aquellas que aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar. Los álabes de las turbinas de acción operan en el aire, impulsadas por uno o varios chorros de agua a presión, el agua permanece a presión atmosférica tanto antes como después de hacer contacto con los álabes de la turbina, [21].

#### Ventajas y desventajas de las turbinas de acción

**Tabla 1.6.** Ventajas y desventajas de las turbinas de acción.

Ventajas	Desventajas
<b>Pelton</b>	
Baja probabilidad de cavitación, y fabricación sencilla. Mantenimiento económico. Los alabes son robustos y duraderos. Alto rendimiento a cargas parciales (superior al 80% para un 20% del caudal nominal)	Requiere de múltiples inyectores para hacer frente a grandes caudales. Baja velocidad de operación, lo cual incrementa los costos respecto las turbinas de reacción. Para potencias altas, requiere grandes áreas debido a su gran rodete.
<b>Turgo</b>	
Baja probabilidad de cavitación. Reducción considerable del diámetro (hasta la mitad del de una Pelton). Menor número de inyectores, llevando a una simplificación en el sistema de control de velocidad. Permite acoplamiento directo al generador debido a su mayor	Debe soportar grandes cargas axiales sobre los cojinetes debido al chorro inclinado. Su eficiencia (aprox. 85%) es menor que la de una turbina Pelton (91%). Fabricación compleja, debido a la complejidad de sus alabes los cuales se superponen y son más frágiles.

velocidad angular.	
<b>Michell – Banki</b>	
Construcción sencilla, pocas piezas movibles. Facilita el mantenimiento. Sencilla instalación, bajo costo de obra. Mas económica que los demás tipos de turbinas utilizadas en PCH. Permite fabricación local.	Baja eficiencia (65%-84%) con respecto a las demás turbinas tanto de acción como de reacción. Bajas potencias superiores a 1000 kW.

**Fuente:** [22]

### 1.2.3.5.2. Turbinas de reacción

Este tipo de turbinas cuentan con un diseño de rotor que permite aprovechar la presión que aún le queda al agua a su entrada para convertirla en energía cinética. Esto hace que el agua al salir del rotor tenga una presión por debajo de la atmosférica. El rotor de las turbinas de reacción se encuentra completamente inmerso en el agua, y está encerrado en una cámara de presión; Los álabes del rodete están perfilados por lo que las diferencias de presión a través de ellos imponen fuerzas de elevación, similar a las alas de los aviones, lo que causa que el alabe rote, [21].

### Ventajas y desventajas de las turbinas de reacción

**Tabla 1.7.** Ventajas y desventajas de las turbinas de reacción.

Ventajas	Desventajas
<b>Francis</b>	
Bajas pérdidas hidráulicas, alta eficiencia, alta velocidad específica, bajos costos en acoplamiento con el generador. Opera a grandes rangos de alturas y caudales.	Problemas de cavitación. Bajo rendimiento a cargas parciales. Alto desgaste de erosión por su geometría.
<b>Kaplan</b>	
Alta velocidad específica, los alabes del rodete y distribuidor pueden adaptarse a cambios de salto y caudal. Su alta velocidad de rotación permite reducir su tamaño.	Altas velocidades de embalamiento. Los sistemas de regulación aumentan su costo considerablemente. Presenta alto riesgo de cavitación.
<b>Bulbo</b>	
Turbina-generador dentro del bulbo, bajo costo de obras civiles.	Fabricación y mantenimiento complejo y costoso.

**Fuente:** [22]

### 1.2.3.6. Clasificación de acuerdo al tamaño o capacidad de generación de energía eléctrica de la turbina

- Mini turbinas: Según las normas europeas las mini centrales hidroeléctricas son aquellas que están comprendidas en el rango de 100kW a 1000Kw de potencia. Según la organización Latinoamericana de Energía clasifica en el rango de 50kW a 500kW. Los modelos desarrollados por ITDG cubren el rango de 50kW a 1000kW, [23].
- Micro turbinas: Las microturbinas son aquellas que tiene una capacidad de generar un menor o igual a 100 kW. Se usan en zonas rurales aisladas donde se aprovechan los recursos hidro-energéticos que existen en pequeños ríos o quebradas para transformarlos en energía mecánica o eléctrica. Para hacer posible este proceso se tiene que hacer un grupo de obras, así como obtener equipos especiales, estos se dividen normalmente en tres grupos: obras civiles, equipo electromecánico y redes eléctricas, [23].
- Pico turbinas: La aparición de pico centrales hidroeléctricas y consecuentemente de pico turbinas, tiene apenas una década. El rango de picos centrales está por debajo de los 10kW. Los picos turbinas se aprovechan por los recursos hidráulicos existentes en quebradas muy pequeñas, manantiales u otras fuentes donde existen algunos chorros de agua y alguna pequeña caída que podría transformarse en energía mecánica o eléctrica. Los picos turbinas se diseñan en la actualidad como pequeños bloques compactos, donde en una sola unidad se incluyen todas sus partes. Se caracteriza principalmente por su pequeño tamaño, su versatilidad y por su facilidad para el transporte e instalación, [23].

#### 1.2.4. Turbina Turgo

La turbina Turgo fue desarrollada por la compañía Gilkes Energy en el año 1919. Es una turbina de chorro libre y de acción (grado de reacción = 0). La totalidad de la energía potencial será convertida en energía cinética antes de entrar al rodete (el cambio de energía estática al interior del rodete es nulo). Su campo de aplicación se encuentra entre las turbinas Francis y Pelton y sus principales componentes son el rodete y el inyector, muy similar a la turbina Pelton salvo por la forma de sus álabes (la mitad de los álabes Pelton), [24].

El chorro incide en los álabes (generalmente con un ángulo de 20° respecto al plano diametral del rodete), entrando por un lado del disco diametral y saliendo por el otro (este ángulo permite la salida del agua lo más eficiente posible). A diferencia de la Pelton, el diseño de una

turbina Turgo permite que el chorro de agua impacte en varias cucharas simultáneamente, [24].



**Figura 1.7.** Turbina Turgo.

**Fuente:** [25]

La turbina Turgo es una turbomáquina motora de acción, a chorro libre, de flujo radial. El rodete de la misma se asemeja a un medio rodete Pelton, como si a este se le dividiera mediante un plano que pasa por las aristas de las cucharas y sea perpendicular al eje. Tiene varias ventajas sobre la turbina Francis y la Pelton en determinadas aplicaciones. El rodete es más barato de fabricar que el de una Pelton, no necesita una carcasa hermética como la Francis, dispone de una velocidad específica más elevada y puede manejar un mayor flujo para el mismo diámetro que una turbina Pelton, [26].

El distribuidor de la turbina Turgo consiste básicamente en un inyector del tipo que proyecta un chorro de agua inclinado respecto al eje del Rodete, en un ángulo de  $15^\circ$  a  $22.5^\circ$ , [26].

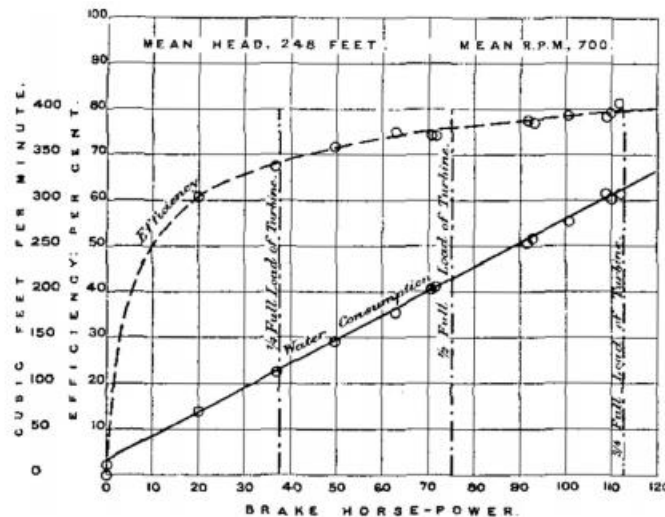
En esta turbina la energía cinética del agua, en forma de chorro libre, se genera en una tobera colocada al final de una tubería de presión. La tobera está provista de una aguja de cierre para regular el caudal, constituyendo el conjunto el órgano de alimentación y de regulación de la turbina. Como la energía cinética del agua del chorro decrece con la distancia al orificio de salida, conviene colocar los inyectores lo más cerca posible del rodete, [24].



**Figura 1.8.** Turbina Turgo.

**Fuente:** [27]

La turbina Turgo de 1920 fue probada de forma independiente por el Dr. AH Gibson de la Universidad de Manchester, la cual mostro una eficiencia máxima del 83.5% bajo una cabeza de 200 pies, produciendo 106 HP, a 640 rpm, los resultados de la prueba inicial se pueden observar en la figura 1.9, [28]



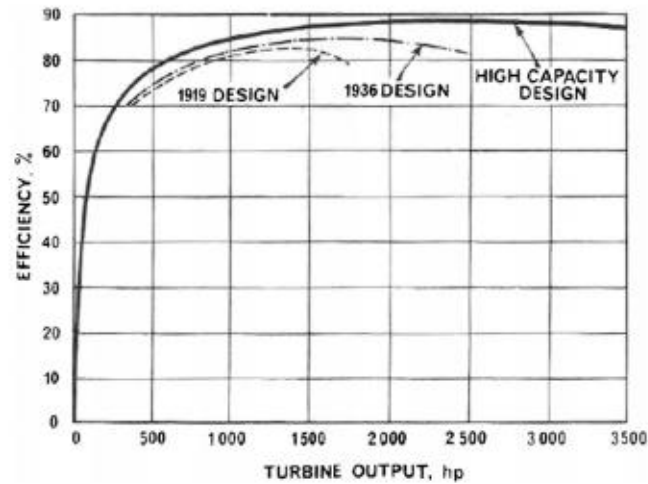
**Figura 1.9.** Resultados de las pruebas del diseño de Crewdson Turgo de 1920 realizadas en Afon Calettwr

**Fuente:** [28]

Las mejoras adicionales realizadas en el diseño de Turgo fueron dirigidas nuevamente por Ernest Jackson en 1960. Al hacer un corredor de madera con la forma en que aparecería en el marco de referencia del chorro mientras giraba, el perfil se talló y se rellenó con cera de parafina y tan utilizado para mejorar la forma del corredor. Usando este perfil mejorado, la



eficiencia aumentó considerablemente, manteniéndose alta incluso cuando la boquilla está en la posición completamente abierta figura 1.10, [28].



**Figura 1.10.** Eficiencia y rendimiento para un Turgo de 24 pulgadas. de diámetro medio bajo una carga de 750 pies.

**Fuente:** [28]

## 1.2.5. Partes de una turbina Turgo

### 1.2.5.1. Rodete

El rodete de la turbina Turgo es semejante a un medio rodete de turbina Pelton, como se puede apreciar en la figura 1.11, el cual se divide justo en la mitad de la cuchara. El rodete es de admisión parcial y puede ser instalado con un eje horizontal o vertical, dependiendo de las condiciones de instalación. Por las características del rodete, esta turbina es comúnmente utilizada en instalaciones de pequeñas centrales hidroeléctricas, [29].

De este modo, para el mismo diámetro de chorro ocupado en una turbina Pelton, el rodete de la turbina Turgo resulta ser más pequeño, permitiendo obtener una mayor velocidad de rotación del eje, lo que permite obtener mayor energía, por ende, se habla de una eficiencia mayor a la de la turbina Pelton, [29].



**Figura 1.11.** Rodete de una turbina Turgo.

**Fuente:** [29]

### 1.2.5.2. Distribuidor

Es el conducto por donde ingresará la corriente de agua que va a accionar a la turbina. Como se puede apreciar en la figura 1.12, este conducto también cumple en ciertas ocasiones la función de carcasa, misma que protege a los álabes de la turbina, [29].

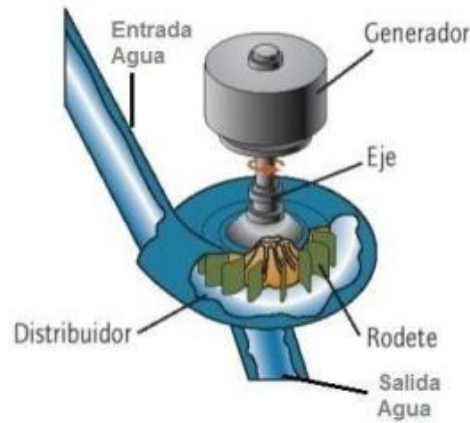


**Figura 1.12.** Distribuidor de una turbina Turgo.

**Fuente:** [29]

### 1.2.5.3. Álabes

Son las partes que van a resistir el chorro de agua, permitiendo así la rotación del eje. La forma de los álabes va a depender del perfil de velocidad de cada geometría a utilizar, siendo las más usadas las de geometría semicircular, como se observa en la figura 1.13, por la forma de salida del chorro de agua, [29].

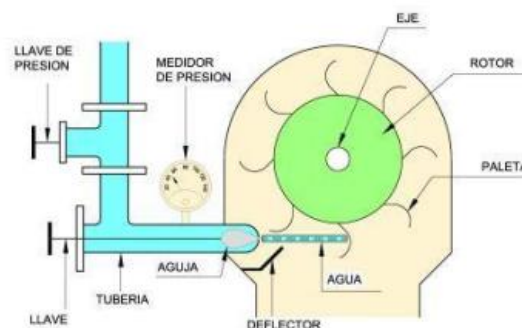


**Figura 1.13.** Forma de los álabes de una turbina Turgo.

**Fuente:** [29]

#### 1.2.5.4. Eje

El eje de una turbina Turgo puede ser instalado de manera horizontal o de manera vertical. Los grupos horizontales suelen tener un eje común para la turbina y el alternador, mismos que soportan la flexión inducida por la fuerza radial que genera el golpe del chorro de agua en los álabes. El esquema de este tipo de turbina se puede ver en la figura 1.14. Los grupos verticales se equipan con un alternador y con un cojinete de empuje, mismo que solo debe soportar el peso de todo el grupo, puesto que no se cuenta con un apoyo hidráulico para el sistema. El rodete de los grupos verticales se desmonta del eje extrayendo los pernos de la brida de unión, [29].

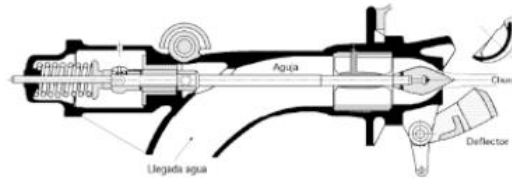


**Figura 1.14.** Sistema de eje horizontal de una turbina Turgo.

**Fuente:** [29]

### 1.2.5.5. Inyectores

Son los mecanismos encargados del ingreso del agua al sistema de álabes para la generación de movimiento. Controlan el caudal y el flujo de presión, transformándolos en un chorro de agua, mismo que se dirige tangencialmente a la circunferencia descrita por los centros de impacto de los álabes. La figura 1.15, muestra el diagrama de un inyector, [29].



**Figura 1.15.** Diagrama del inyector de la turbina Turgo.

**Fuente:** [29]

### 1.2.6. Principio de funcionamiento

La turbina Turgo es una turbina de tipo impulso, por lo que el agua dentro de la turbina no cambia de presión cuando pasa a través de los álabes de la turbina. La energía potencial del agua se convierte en energía cinética en la tobera de entrada o inyector. El chorro de agua a alta velocidad se dirige contra los álabes de la turbina que lo desvían e invierten el flujo. El impulso resultante hace girar el rodete de la turbina, comunicando la energía al eje de la turbina. Finalmente, el agua sale con muy poca energía. Los rodetes de una turbina Turgo pueden tener un rendimiento por encima del 90%, [30].

La velocidad específica de los rodetes Turgo se encuentra situada entre la de las turbinas Francis y Pelton. Se pueden usar una o varias toberas o inyectores. Incrementando el número de inyectores se incrementa la velocidad específica del rodete en la raíz cuadrada del número de chorros (cuatro chorros rinden dos veces la velocidad específica de un chorro para la misma turbina), [30].

Para poder seleccionar la turbina se tiene que considerar al caudal ( $Q$ ) con la altura neta ( $H_n$ ). Así la potencia de la turbina  $P_t$  será el producto de estos valores lo mismo con la eficiencia  $\eta_t$  como se indica en la tabla 1.8.

$$P_t = \rho g H_n Q \eta_t \quad \text{Ecuación 1.18}$$

Donde:

$\rho$ = densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$g$ = gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

Para el cálculo de la eficiencia de la turbina, es la relación de la potencia mecánica y la potencia de la turbina.

$$\eta_t = \frac{P_M}{P_t} \quad \text{Ecuación 1.19}$$

La eficiencia de la turbina Turgo se calcula por el cambio de velocidad del agua de ingreso y de salida.

La figura 1.16, muestra los vectores de velocidad y el golpe del chorro de agua que impacta en un alabe.

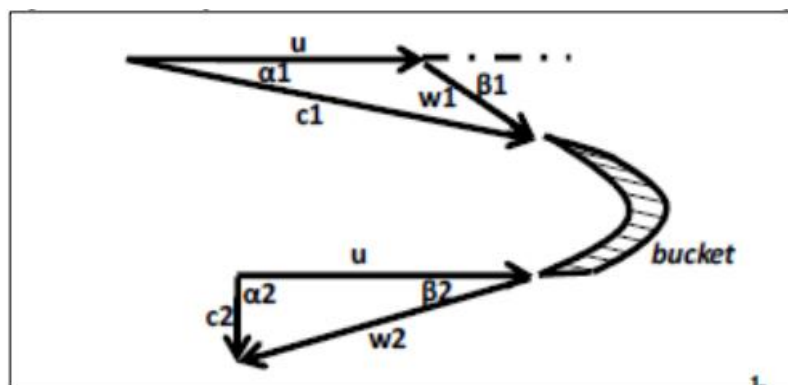
$$u = \frac{D * \pi * N}{60} \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Donde:

$u$ = velocidad del alabe

$D$ = diámetro tentativo de rodamiento

$N$ = velocidad (rpm)



**Figura 1.16.** Triangulo de velocidades de un solo alabe de una turbina Turgo.

**Fuente:** [31]

El diámetro del rodete desde el eje de impacto de chorro, puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$D_1 = 40.8 * \frac{\sqrt{H_n}}{N} \quad \text{Ecuación 1.21}$$

Para el cálculo de la velocidad de entrada, se tiene en cuenta la velocidad absoluta  $c_1$  y la velocidad relativa  $w_1$ .

$$c_1 = kc_1 \sqrt{2gH} \quad \text{Ecuación 1.22}$$

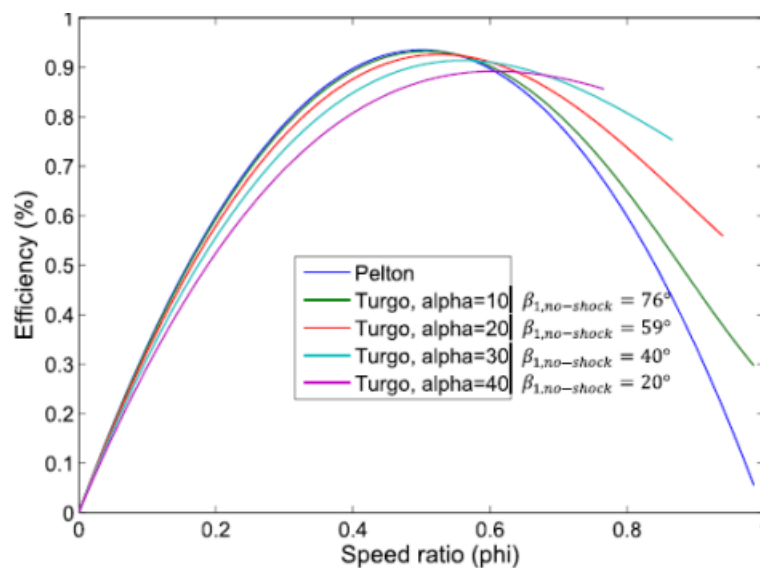
Donde:

$kc_1$  = coeficiente de velocidad del inyector

El factor de eficiencia de chorro  $k_w$  en 95% y el factor de eficiencia de chorro  $kc_1$  en 98% el valor de  $\alpha_2 = 90^\circ$ .

$$w_1 = c_1 - u \quad \text{Ecuación 1.23}$$

Los ángulos  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se encuentran en la relación básica de trigonometría, el ángulo de ingreso del chorro  $\alpha_1$  es de un  $20^\circ$ .



**Figura 1.17.** Ángulo  $\alpha_1$  en relación a la velocidad.

**Fuente:** [31]

El flujo masico del inyector define a la velocidad absoluta del inyector, se asume la siguiente ecuación:

$$flujo\ mástico\ del\ inyector = c1 * \frac{\pi}{4 * \left(\frac{d}{12}\right)^2} * 62.4 \quad Ecuación\ 1.24$$

Para el cálculo de la potencia teórica del inyector se multiplica el flujo masico del inyector por la altura neta y la eficiencia del generador:

$$P_{inyector} = flujo\ mástico * Hn * \eta G \quad Ecuación\ 1.25$$

El coeficiente de operación del inyector puede estar entre 55-43%. Puede ser hallado relacionando la fuerza de ingreso del chorro al inyector y su salida.

$$\vec{P} = \overrightarrow{P_{entrada}} - \overrightarrow{P_{salida}} \quad Ecuación\ 1.26$$

En el presente caso será la velocidad relativa y el flujo masico del inyector, como el momento lineal de la velocidad y la masa.

$$\vec{P} = m\vec{w} \quad Ecuación\ 1.27$$

En momento lineal tangencia en la entrada y salida del alabe, se conoce la siguiente ecuación:

$$P_{entrada} = (c1 - u) * \cos(\alpha) * flujo\ mástico\ del\ inyector \quad Ecuación\ 1.28$$

$$P_{salida} = Cb * (u - c1) * \cos(\beta1) * flujo\ mástico\ del\ inyector \quad Ecuación\ 1.29$$

Se procede al cálculo del torque producido por un alabe:

$$\tau = P * (D/2) \quad Ecuación\ 1.30$$

En la ecuación 31 la potencia mecánica que genera el alabe es el producto de la velocidad y la fuerza:

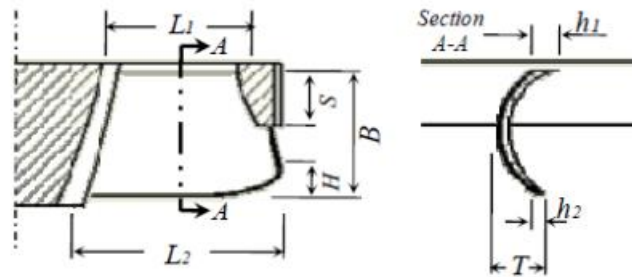
$$Potencia\ mecánica = u * \vec{P} \quad Ecuación\ 1.31$$

La ecuación 4 define la eficiencia de la turbina, la cual el coeficiente de operación del inyector coincide con el valor máximo de la eficiencia de la turbina. Para la dimensión de los alabes va en función del diámetro del chorro, en la figura 1.18, y en la tabla 1.8, describe las

mediadas aceptables entre varios rangos. Donde el valor  $h_1$  es el espesor del alabe la que tiene que soportar el esfuerzo mecánico.

Para el cálculo de números de alabes se considera la siguiente ecuación:

$$\text{número de alabes} = \frac{D}{\pi} * 0.022 \quad \text{Ecuación 1.32}$$



**Figura 1.18.** Dimensiones recomendadas en función del diámetro del inyector.

**Fuente:** [32]

**Tabla 1.8.** Medidas del alabe de la turbina Turgo

**Dimensiones recomendadas en función del diámetro del inyector**

L1 (1,60-1,90) d
B (1,50-2,10) d
h1 (0,25-0,40) d
T (0,45-0,60) d
Alfa 1 (20°)
Beta 2 (<20°)

**Fuente:** [32]

### 1.2.7. Generador Eléctrico

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de sus componentes principales: el rotor (parte giratoria) y el estátor (parte estática). Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento,



una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido). Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen, dando lugar a dos grandes grupos: los alternadores y las dinamos. Los alternadores generan electricidad en corriente alterna y las dinamos generan electricidad en corriente continua, [33].

### **1.2.7.1. Principio de funcionamiento de un generador**

La Ley de Faraday está basada en los experimentos que Michael Faraday, físico británico, realizó en 1830. Establece que el voltaje inducido en un circuito es directamente proporcional al cambio del flujo magnético en un conductor o espira. Esto significa que, si tenemos un campo magnético generando un flujo magnético, necesitamos una espira por donde circule una corriente para conseguir que se genere la fuerza electromotriz (f.e.m.), [33].

### **1.2.7.2. Clasificación de los generadores**

#### **1.2.7.2.1. Generadores mecánicos**

Recurren a la energía mecánica para colocar el generador en funcionamiento. Son los generadores más comunes en el sector de la industria y son también los que presentan, en relación con los demás, una capacidad de transformación de energía superior, así como los más eficientes y diversificados. Las empresas industriales normalmente utilizan este tipo de generadores.

#### **1.2.7.2.2. Generadores solares**

Tienen como función captar la energía solar, para transformarla en energía eléctrica para que pueda ser utilizada en los más diversos equipos. Las placas solares de silicio son un ejemplo de generador solar.

#### **1.2.7.2.3. Generadores térmicos**

Son generadores que transforman la energía térmica en eléctrica. Convierte directamente la energía proveniente del calor, utilizándolo para la creación de energía.

#### **1.2.7.2.4. Generadores químicos**

Son responsables de convertir la energía química en energía eléctrica para alimentar diferentes equipos. Es decir, transforman la energía que se genera en las diferentes reacciones químicas en energía eléctrica. Son ejemplos de este tipo de generadores las baterías. Normalmente se utilizan en equipos con consumos de baja potencia. Por ejemplo, comandos de TV, radios, relojes y otros equipos que utilizamos regularmente en nuestro día a día.

En el generador síncrono el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético, mientras tanto en el generador asíncrono existe un desfase, se le conoce como deslizamiento entre la velocidad del rotor y el campo magnético.

$$\text{Síncrono } n_s = \frac{120f}{p}$$

$$\text{Asíncrono } n_s = \frac{120f}{p}(1 - s)$$

Las máquinas síncronas son de mayor eficiencia que las máquinas de inducción ya que las máquinas de inducción tienen que conectarse en paralelo con la red eléctrica o tener un conjunto de capacitores que mantengas la potencia reactiva para continuar con la magnetización del sistema.

### **1.2.7.3. Generador síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)**

Es muy útil para aquellas aplicaciones a las que se exigen con una tensión partiendo de cero, y por lo tanto no pierdan su excitación en ningún momento. En este caso el sistema de excitación se realiza gracias a las propias características de magnetización de los imanes que generan la fuerza magnetomotriz, que es el funcionamiento de la máquina, [34].

Existen dos tipos de generadores de imanes permanentes:

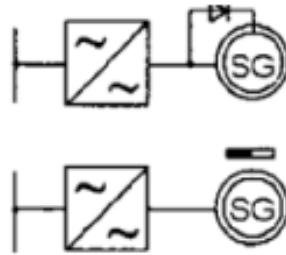
- Generadores de flujo axial: se encuentran insertados a lo largo del rotor y el estator que esta ranurado de forma radial, generando el campo magnético axial.
- Generador de flujo radial: los imanes se encuentran en sentido axial ubicada en la superficie cilíndrica del rotor.

#### **1.2.7.3.1. Sincronización con la red**

Se base en un control que comprende voltaje, frecuencia y desfase y secuencia de fases.

El generador síncrono es una maquina la cual funciona a velocidad constante, la cual se puede trabajar a velocidad variable, obteniendo así una excitación optima de energía, [34].

Debe ir acompañado de un convertidor de frecuencia, este dispositivo tiene que poseer un rectificador para las señales de corriente y voltaje generales, este caso tiene que tener un rango de frecuencia variable.



**Figura 1.19.** Generador síncrono con un convertidor electrónico de potencia como interfaz con la red.

**Fuente:** [34]

**Tabla 1.9.** Eficiencia para generadores PMSG

Potencia nominal kW	10	50	100	250	420
<b>Eficiencia PMSG</b>	0.91	0.94	0.95	0.96	0.96

**Fuente:** [34]

### 1.2.8. Calidad de energía

#### 1.2.8.1. Voltaje

Si el distribuidor no cumple con el nivel de voltaje admisible en el punto de medición y tiene una variación constante de los valores nominales de +5% y el 10%, tal como lo aclara la regulación de COLELEC 004/01. Puede causar varios efectos en la variación de la tensión en la red y estos pueden ser:

- Las sobretensiones pueden disminuir la vida útil de los equipos de una vivienda.
- Al tener motores en la vivienda un bajo voltaje puede provocar un frenado del motor.

**Tabla 1.10.** COLELEC 004/01 Límites admitidos al valor de voltaje nominal.

	Subetapa 1	Subetapa 2
<b>Alto voltaje</b>	±7.0%	±5.0%
<b>Medio voltaje</b>	±10.0%	±8.0%
<b>Bajo voltaje, urbanas</b>	±10.0%	±8.0%
<b>Bajo voltaje, rurales</b>	±13.0%	±10.0%

### 1.2.9. Zonas de seguridad de operación del generador síncrono

Durante las condiciones normales de operación el generador mantiene constante la magnitud de voltaje en sus terminales, por tal razón su punto de operación P, Q, varía constantemente.

La potencia activa despachada está relacionada con la fuerza magnetomotriz en el retoro de la turbina, dependiendo de la variación de la velocidad de la turbina al inyectar agua, por tal razón la potencia reactiva ayuda a tener un control de voltaje la cual tiene reserva de potencia para mantener P, Q, en voltaje y frecuencia constante.

Para obtener los límites de operación del generador depende de los parámetros eléctricos, estos son: potencia activa, potencia reactiva, voltaje en los terminales, corriente de campo y de armadura y factor de potencia.

La potencia activa y reactiva es entregada por el generador estas están limitadas por varios factores mecánicos y eléctricos, las cuales son los siguientes:

- Potencia mínima de la turbina
- Potencia máxima de la turbina
- Límite de corriente máxima del devanado de la armadura
- Límite de corriente máxima de excitación
- Límite de corriente mínima de excitación

#### **1.2.10. Potencia mínima de la turbina**

Es la mínima potencia que puede entregar la turbina en una operación de bajo caudal, la cual no afecta a los componentes mecánicos de la turbina.

El valor de la potencia mínima es dado por el fabricante y es el 25% de la potencia aparente.

$$P_{min} = P_{max} * 0.5 \quad \text{Ecuación 1.33}$$

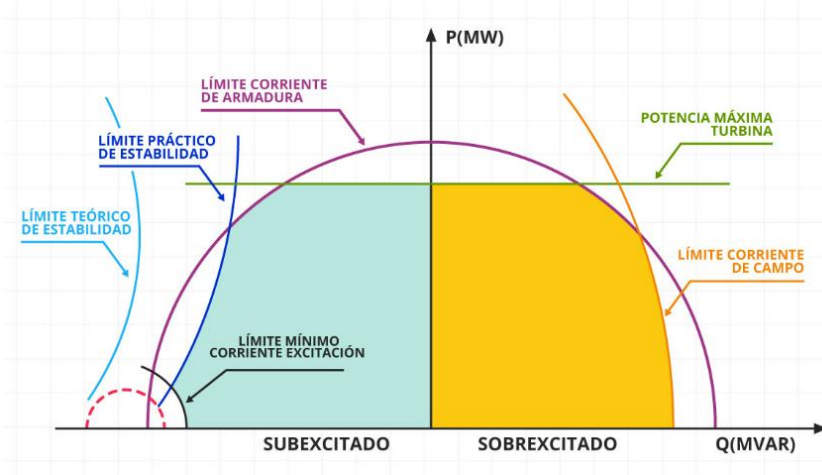
#### **1.2.11. Potencia máxima de la turbina**

Es la potencia máxima generada por la turbina en condiciones normales, dando un esfuerzo mecánico, la cual es igual a la potencia activa nominal del generador.

$$P_{max} = S * fp \quad \text{Ecuación 1.34}$$

#### **1.2.12. Limite por corriente mínima de excitación**

Cuando la corriente de excitación es muy pequeña el generador pueda que no tenga el suficiente torque mecánico para mantener el sincronismo por lo cual podría perder estabilidad.



**Figura 1.20.** Curva de operación de un generador síncrono.

### 1.3. METODOLOGÍA

#### 1.3.1. Investigación Bibliográfica

Según el autor Santa Palella y Feliberto Martins en su libro “Metodología de la Investigación Cuantitativa” define el diseño bibliográfico, se fundamenta en la revisión sistemática, rigurosa y profunda del material documental de cualquier clase. Se procura el análisis de los fenómenos o el establecimiento de la relación entre dos o más variables. Cuando se opta por este tipo de estudio, el investigador utiliza documentos, los recolecta, selecciona, analiza y presenta resultados coherentes, se encuentra en [35].

#### 1.3.2. Investigación Descriptiva

Según Mario Tamayo y Tamayo, en su libro “Proceso de Investigación Científica”, aporta que la investigación descriptiva comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o procesos de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre grupos de personas, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente, se encuentra en [36].

#### 1.3.3. Investigación Experimental

Según Van Dalen D, en su libro “Estrategia de la investigación experimental”, hace referencia que la investigación experimental consiste en la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o porque causa se produce una situación o acontecimiento en particular, se encuentra en [37].

### **1.3.4. Métodos de Investigación**

#### **1.3.4.1. Método Científico**

Según Ruiz Ramón en su artículo “El método científico y sus etapas”, donde dice que el método científico es el procedimiento planteado que se sigue en la investigación para descubrir las formas de existencia de los procesos objetivos, para generalizar y profundizar los conocimientos así adquiridos y llegar a demostrarlos con rigor racional y con ello comprobarlos en el experimento y con las técnicas de su aplicación, se encuentra en [38].

#### **1.3.4.2. Método Deductivo**

Según Gómez Miguel, en su libro “Investigación, escritura y publicación”, menciona que el método deductivo va de un razonamiento general a uno particular, del principio a la consecuencia; infiere una conclusión a partir de una premisa de un principio o de una ley, se encuentra en [39].

#### **1.3.4.3. Método Cuantitativo**

Según Ñaupas Humberto en su libro “Metodología de la Investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción”, donde habla del enfoque cuantitativo que se caracteriza por utilizar métodos y técnicas cuantitativas y por ende tiene que ver con la medición, el uso de magnitudes, la observación y medición de las unidades de análisis, por otro lado, utiliza la recolección de datos y el análisis de los mismos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis formuladas previamente, se encuentra en [40].

### **1.4. Investigación Experimental**

El proyecto de investigación planteado se aplicó el método científico experimental, la cual presenta métodos estadísticos, métodos definatorios y procedimiento de mediciones.

Como primera instancia fue la medición del caudal de agua para identificar la potencia de generación que va a tener el generador.

Al realizar los cálculos respectivos y seleccionar el tipo de turbina hacer implementada en el sistema de generación, se procede a la determinación del generador que va ayudar a la transformación de la energía mecánica por la turbina a energía eléctrica.

Instalación de medidor de parámetros eléctricos, para llevar un control del nivel de voltaje generador por el generador, para el abastecimiento de la carga.

## **1.5. Técnicas e Instrumentos**

### **1.5.1. Técnicas**

#### **1.5.1.1. Lectura Comprensiva**

Se llevará la interpretación y la comprensión de la investigación bibliográfica, conjuntamente con la información técnica y datos necesarios para la generación de energía.

#### **1.5.1.2. Software**

La utilización del software para realizar el estudio de carga y dimensionamiento de las protecciones y diseño del plano eléctrico.

### **1.5.2. Instrumentos**

El instrumento de medición utilizado: SENTRON PAC la cual ayuda para llevar un control del voltaje generado en cada instante que el generador está en operación.

## **1.6. Conclusiones**

- Con el avance de los años las energías renovables no convencionales han ido tomando mayor fuerza para el abastecimiento de suministro eléctrico, en lugares que no puede llegar la red de distribución.
- Las micro turbinas son utilizadas y seleccionadas, para su utilización en lugares donde que el recurso hídrico está dado por pequeños caudales.
- Tanto la turbina y el generador son elementos indispensables para la generación de energía eléctrica, teniendo en cuenta la tubería de presión y el recurso hídrico que ayudara a la producción de energía.

## CAPÍTULO II

### PROPUESTA

#### 2. Título del proyecto

“IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE”.

##### 2.1. Objetivo del proyecto

Aprovechar el recurso energético existente, para la implementación de un sistema de pico-generación eléctrica, mediante una turbina Turgo de baja potencia.

##### 2.2. Justificación de la propuesta

La incorporación de una fuente de energía renovable no convencional en la actualidad es muy utilizada en zonas aislada, que no tienen acceso al suministro eléctrico de la red de alguna empresa distribuidora de energía.

La implementación de un sistema de pico-generación con una potencia activa de 500W, abasteciendo del suministro eléctrico a una vivienda, alcanzando un beneficio y mejorando la calidad de vida de las personas que habitan la residencia.

##### 2.3. Fundamentación de la propuesta

La importancia de realizar este proyecto, es ir familiarizando a las personas y conocer las fuentes de energía renovables que son amigables con el medio ambiente, la cual su implementación no es costosa, logrando cubrir las necesidades de un hogar que no cuenta con suministro eléctrico.

##### 2.4. Metodología o procedimientos empleados para el procedimiento de los objetivos planteados

Mediante un previo estudio y recolección de datos del caudal de agua y la altura para el diseño de la pico central hidroeléctrica, se realiza cálculos matemáticos para la determinación de la potencia que llega a generar para abastecer la carga de la vivienda.

Para cumplir con los requerimientos y equipos del sistema de monitoreo de la tensión generada por el sistema de pico-generación, la cual se adapta a las necesidades del usuario. Se detallarán a continuación:



## **2.4.1. Requerimientos**

### **2.4.1.1. Caudal de Agua**

Se realiza una inspección en campo para observar donde se puede tener el recurso importante para la generación de energía que es el agua. Obteniendo el caudal se realiza la medición para conocer cuántos litros por segundos abastece el caudal.

### **2.4.1.2. Selección de la turbina hidráulica**

Luego de conocer el porcentaje de caudal a tener, se procede al cálculo para la selección de la turbina hidráulico, en este caso es una turbina tipo Turgo, la cual cumple con los requerimientos del tipo de caudal y ayudara en la generación de energía eléctrica.

### **2.4.1.3. Monitoreo de los parámetros de generación**

Toda fuente de generación de energía eléctrica, debe contener un centro de monitoreo de voltaje, corriente, potencia, para que se pueda determinar su operación y llevar un registro de los valores obtenidos mediante la generación ya sea esta: hidráulica, fotovoltaica, eólica, etc.

## **2.4.2. Equipos**

### **2.4.2.1. Turbina hidráulica**

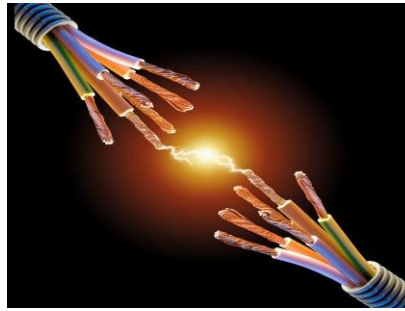
Una turbina hidráulica es una máquina que transforma la energía cinética del caudal de agua, en energía mecánica por medio de alabes, este tipo de energía es utilizada para la generación de energía eléctrica.

### **2.4.2.2. Generador**

El generador eléctrico es una maquina rotativa la cual transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Tiene dos elementos principales como es el estator que es la parte estática del generador y el rotor es la parte móvil.

### **2.4.2.3. Cables**

Son conductores eléctricos que ayudan el paso de la corriente de un extremo a otro, la cual se utilizan en instalaciones residenciales, industriales, depende la aplicación que va a realizar se selecciona el tipo de conductor.



**Figura 2.1.** Conductores eléctricos.

#### **2.4.2.4. Protección termomagnética**

Los interruptores termomagnéticos están diseñados para interrumpir las corrientes elevadas de un circuito cuando estas sobrepasan su límite máximo.



**Figura 2.2.** Interruptor termomagnético.

#### **2.4.2.5. SENTRON PAC 3220**

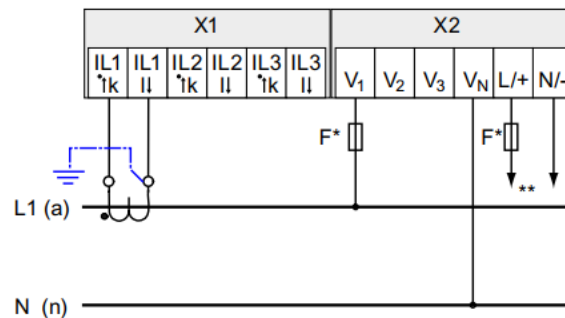
El SENTRON PAC3200 es un multímetro tipo central de medida para la visualización de todos los parámetros de red relevantes en la distribución de energía eléctrica en baja tensión. Puede realizar mediciones monofásicas, bifásicas y trifásicas, y puede utilizarse en redes (sistemas) en esquema TN, TT e IT de dos, tres o cuatro conductores, [41].

Se puede conectar directamente a cualquier tipo de red de baja tensión, soportando una tensión máxima de hasta 690 V.



**Figura 2.3.** SENTRON PAC 3220.

Para la conexión del medidor de parámetros del generador se tiene que tener en cuenta el siguiente diagrama y el tipo de modelo que se va a conectar al sistema.



**Figura 2.4.** Tipo de conexión 1P2W, para sistemas monofásicos.

#### 2.4.2.6. Panel de control

El gabinete eléctrico va constar de todos los elementos de protección y de medición del sistema de pico-generación, la cual tiene que proporcionar una protección de IP42, las dimensiones adecuadas para las conexiones del sistema.



**Figura 2.5.** Panel de control del sistema de pico-generación.

**Elaborado por:** Antonio Tapia.

### 2.4.3. Diseño del sistema de pico-generación hidráulica

#### 2.4.3.1. Análisis del potencial hídrico

En la tabla 2.1 se encuentra los valores obtenidos del caudal de agua, en un tiempo promedio de 5,15s, tiempo en el cual se llena un tanque de 25lt, la cual se obtiene un caudal disponible de 5lt/s.

**Tabla 2.1.** Medición del caudal de agua

MEDICIONES	TIEMPOS (l/s)
T01	5,08
T02	4,96
T03	5,35
T04	5,30
T05	5,20

Elaborado por: Antonio Tapia

#### 2.4.3.2. Presión nominal

Para el cálculo de la presión nominal es determinada por la fórmula de presión por altura, la cual ayuda a la determinación del diámetro de la tubería hacer implementada, aplicando la ecuación 1.1.

$$p = \frac{1000kg}{m^3} * \frac{9,81m}{s^2} * 14m$$

$$p = 137200 \text{ pa} = 19.88 \text{ Psi}$$

#### 2.4.3.3. Potencia neta estimada

El principal parámetro de diseño en el cual se puede determinar la potencia hidráulica en función de la altura neta, ecuación 1.18.

$$Pt = \rho * g * Hn * Q * \eta t$$

$$Pt = 998 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} * 14m * 0.05 \frac{m^3}{s} * 0.85 = 583.1 \text{ Watt}$$

#### 2.4.3.4. Tubería de presión

Para la selección de la tubería de presión se tiene que tener en cuenta el espesor de la tubería, la perdida generada por la altura de fricción si como el golpe de ariete, tiene en cuenta las uniones necesarias y el costo del material para la inversión.

#### 2.4.3.5. Material de la tubería

La selección de la tubería implica el costo total, al revisar la tabla 1.1., donde explica las características de cada material se puede seleccionar el polietileno de alta densidad, la cual tiene una baja fricción en pérdidas, tiene una alta resistencia a la corrosión y un bajo costo.

#### 2.4.3.6. Pérdidas en la tubería

En las pérdidas de presión en el recorrido de la tubería no debe sobre pasar del 4-10%, la cual se utiliza las ecuaciones desde la ecuación 1.2 hasta la ecuación 1.6.

Luego de proceder con los cálculos, se obtiene como resultado unas pérdidas del 7%, la cual para que no afecte el rendimiento de la turbina se escoge una tubería de 2 pulgadas.

#### 2.4.3.7. Golpe de ariete

Para conocer la propagación de onda del golpe de ariete se utiliza la ecuación 1.10 hasta la ecuación 1.15, la cual el resultado en la propagación de onda de un 326.8 m/s, con un tiempo de parada de agua del 4s, y la longitud crítica de 556.

#### 2.4.3.8. Turbina

La obtención de la carga eléctrica del domicilio observe el Anexo 1 y teniendo en cuenta las pérdidas que produce la tubería de presión, se tiene que seleccionar una turbina adecuada para una altura de 14 m y un caudal de  $0.05m^3/s$ .

En la figura 1.5., esta detallada las características de cada tipo de turbina para sistemas de microgeneración a nivel mundial, la eficiencia para una turbina Turgo es del 85%.

Estudiando la composición de las turbinas de impulso. Existen dos tipos de turbinas apropiadas para una microgeneración turbina Pelton y Turgo, las cuales presentan ventajas similares. Sin embargo, la turbina Turgo destaca para un sistema compacto de microgeneración.

La turbina Turgo con un solo inyector destaca siendo la más alta y confiable para las variaciones del caudal. Para el diseño compacto de la turbina tiene que permitir al acople directo con el eje del generador. La cual permite despreciar las pérdidas de tracción mecánicas generadas. Se propone realizar un cálculo para un generador de 4 polos de 1800 RPM.

$$N_s = N * \frac{\sqrt{P}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

$$N_s = 1800RPM * \frac{\sqrt{583.1 * 0.00134102}}{\sqrt[4]{14^3}} = 58.8$$

Con la velocidad base especificada, se tiene un tipo de turbina adecuada es la turbina Turgo. Se procede al cálculo de la dimensión de la turbina en base a lo expuesto en el capítulo anterior.

$$D_1 = 40.8 * \frac{\sqrt{H_n}}{N}$$

$$D_1 = 40.8 * \frac{\sqrt{14m}}{1800RPM} = 0.084m$$

Para el dimensionamiento del inyector depende del diámetro de ingreso, diámetro de salida y del diámetro de la tubería.

$$D_{inyector} = 0.54 * \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{H_n}}}$$

$$D_{inyector} = 0.54 * \sqrt{\frac{0.005}{\sqrt{14}}} = 0.01974$$

Al ejecutar las ecuaciones 20, 22 y 23, se tiene una eficiencia de corro con la velocidad relativa del 95% y la eficiencia del chorro del 98%. Cuyos datos obtenidos se encuentran en la tabla 2.2.

Aplicando las ecuaciones 21, 24, 25 muestra las características estáticas del inyector, los valores obtenidos se encuentran en la tabla 2.2

**Tabla 2.2.** Valores obtenidos para el chorro del alabe.

PARAMETROS	VALORES
Altura neta (H)	14m
Caudal (Q)	0.005 m <sup>3</sup> /s
Velocidad (N)	1800 rpm
Eficiencia del chorro velocidad relativa (kw)	95%
Eficiencia del chorro (kc1)	98%
Diámetro del rodete (D)	0.084m
Alfa 2	90°
Velocidad del rodete (u)	7.92m/s

Velocidad absoluta a la entrada (c1)	15.7m/s
Velocidad relativa (w)	7.82m/s
Alfa 1	20°
Beta 1	41°
Beta 2	19°

Elaborado por: Antonio Tapia.

Tabla 2.3. Datos obtenidos para el inyector

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES
Diámetro del rodete	mm	84.1
Diámetro del inyector	mm	19.74
Coefficiente de descarga del inyector	Cd	0.95
Altura neta	M	14
Angulo de entrada	Grados	20
Coefficiente de velocidad del alabe	Cb	0.98
Angulo de salida	Grados	19
Velocidad del inyector	m/s	16.6
Velocidad real del inyector	m/s	15.7
RPM al 50% del chorro	rpm	1884.28
Tasa de flujo de la boquilla individual	cfs	0.17
Tasa de flujo de la boquilla individual	gpm	75.37
Flujo masico de la boquilla individual	lt/s	10.48
Potencia teórica	hp	0.88
Eficiencia del generador	Porcentaje	85
Potencia eléctrica por inyector	W	556
Numero de inyectores	K	1
Potencia total	W	556

Elaborado por: Antonio Tapia.

Al determinar el número de palas que necesita el rodete.

$$\text{número de alabes} = \frac{D}{\pi} * 0.022$$

$$\text{número de alabes} = \frac{0.084}{\pi} * 0.022 = 11.99 \cong 12$$

Luego de realizar todos los cálculos respectivos, en la tabla 2.4, se demuestran los parámetros obtenidos para la turbina Turgo.

**Tabla 2.4.** Parámetros generados por la turbina Turgo

PARÁMETROS	VALORES
Altura (m)	14
Velocidad de chorro (m/s)	16.6
Velocidad del rodete (m/s)	7.92
RPM	1809
Flujo del caudal (lt/s)	5
Potencia de la turbina (W)	570
Potencia eléctrica (W)	500
Potencia de la turbina (hp)	0.7
Flujo de la boquilla (gpm)	75.3
Flujo de la boquilla individual (cfs)	0.17
Presión (PSI)	variable

Elaborado por: Antonio Tapia.

#### 2.4.3.9. Generador eléctrico

Con los resultados obtenidos, y la dimensión de la turbina Turgo, con una velocidad de 1800 rpm. Al identificar las necesidades de la vivienda con el estudio de carga realizado véase Anexo 2, se eligió un generador sincrónico de imanes permanentes con un estator bobinado; sus características son las siguiente:

**Tabla 2.5.** Datos del generador síncrono monofásico de imanes permanentes.

PARÁMETROS	UNIDADES	DATOS
Potencia activa	W	500
Frecuencia	Hz	60
Voltaje nominal	V	120
Rendimiento	$\eta$	85%
Reactancia síncrona	Xd	10.47%
Aislamiento		H
Protección	IP	44
Factor de potencia	fp	0.85



<b>Corriente nominal</b>	A	4.2
<b>Temperatura de operación</b>	°C	-25 a 50

Elaborado por: Antonio Tapia.

Teniendo los datos se procede al cálculo de la potencia aparente del sistema:

$$S = \frac{P}{fp} = \frac{500}{0.85} = 588.23 = 0.58823 \text{ kVA}$$

Después de la selección del modelo de generador que abastecerá la carga de la vivienda, se desarrolla la curva de operación.

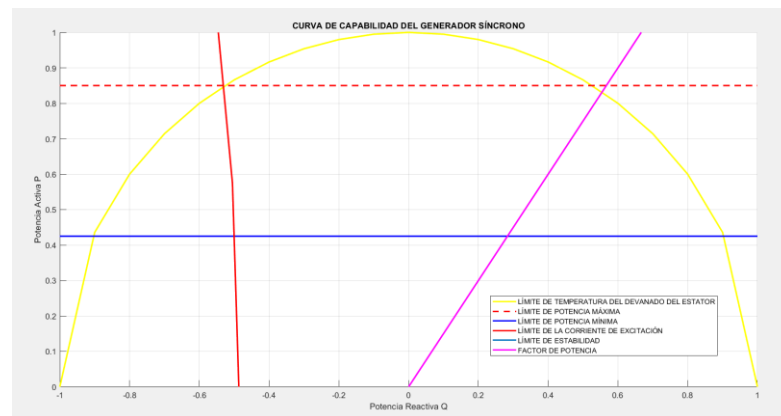


Figura 2.6. Curva de operación del generador síncrono

Elaborado por: Antonio Tapia.

```

INGRESE LOS DATOS :
INGRESE EL VALOR DE LA POTENCIA APARENTE EN (KVA): 0.58823
INGRESE EL VALOR DEL VOLTAJE EN (KV): 0.120
INGRESE EL VALOR DEL FACTOR DE POTENCIA: 0.85
INGRESE EL VALOR DE LA REACTANCIA SÍNCRONA EN p.u: 0.1047
Pulse 1 si el f.p. está en adelanto, de lo contrario pulse 2: 1
RESULTADOS :
POTENCIA APARENTE BASE ES = 1.000
VOLTAJE BASE ES = 1.000
LA CORRIENTE p.u = 1.000
EL ÁNGULO DE LA CORRIENTE EN GRADOS = 31.788
EL MÓDULO DEL VOLTAJE INTERNO DEL GENERADOR p.u = 0.949
EL ÁNGULO DEL VOLTAJE INTERNO DEL GENERADOR EN GRADOS = 5.381
LA POTENCIA ACTIVA MÁXIMA p.u = 0.850
LA POTENCIA REACTIVA MÁXIMA p.u = 0.527
LA POTENCIA ACTIVA MÍNIMA p.u = 0.425

```

Figura 2.7. Datos obtenidos de la simulación.

Elaborado por: Antonio Tapia.

#### 2.4.4. Velocidad de rotación del generador

Para el cálculo de la velocidad de rotación del generador se tiene que tener en cuenta el número de polos que va tener la máquina síncrona la cual puede ser de 2 polos o 4 polos, considerando la velocidad en rpm de la turbina.

$$f_e = \frac{n_m * p}{120} = \frac{1800 * 4}{120} = 60 \text{ Hz}$$

Realizado el cálculo para determinar la velocidad de rotación del generador, determina que funcionara a una frecuencia eléctrica de 60 Hz.

#### 2.4.5. Dimensionamiento de los elementos del sistema de control

##### 2.4.5.1. Cálculo del interruptor termomagnético

Se calculo el termomagnético principal que va a proteger al sistema de control contra sobretensiones que se produzcan en aguas arriba del sistema de control.

$$I = \frac{500 * 1.25}{120} = 5.20 \text{ A}$$

Calculado el valor del interruptor termomagnético se selecciona un interruptor de 6 amperios que protegerá al sistema de control.

##### 2.4.5.2. Cálculo de conductor eléctrico hacer utilizado

Se tiene que tener en cuenta la eficiencia del generador que va tener la cual es de  $N=0.85$

$$I = \frac{500}{120 * 0.85 * 0.85} = 3.010 \text{ A}$$

De acuerdo a la distancia que tiene el tablero de control se selecciona el calibre de conductor.

$$S = \frac{2 * L * I}{V * \%Error \text{ menor a } 1}$$

$$S = \frac{2 * 70 * 3.010}{120 * 0.9} = 3.90 \text{ mm}^2$$

**Tabla 2.6.** Diámetro de conductores eléctricos AWG.

Sección AWG	Sección mm <sup>2</sup>	Corriente (Amperios)
20	0.5	3
18	1	7
16	1,5	10
14	2,5	15
12	4	20
10	6	30
8	10	40
6	16	55
4	25	70

Según la tabla de conductores AWG se debe seleccionar un calibre de conductor 12 AWG, se tiene que considerar las cargas que va tener la vivienda se utiliza un cable de alimentación número 10 AWG.

#### 2.4.6. Caída de tensión

El cálculo de la caída de tensión del sistema, se procede aplicar la siguiente ecuación:

$$e\% = \frac{100 * I * L * R}{V} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

e%: caída de tensión en %

I: la corriente de alimentación

L: distancia del conductor

R: resistencia del conductor

V: voltaje del sistema

$$I = \frac{500}{120} = 4.16 \text{ A}$$

$$I_c = 4.16 * 1.25 = 17.68 \text{ A}$$

$$e\% = \frac{100 * 17.68 * 0.070 * 3.6}{120} = 3.71\%$$

#### **2.4.7. Sistema de puesta a tierra**

Todo elemento que opera con energía eléctrica, debe estar conectado a tierra para desviar en el caso que suceda un cortocircuito y pueda actuar la protección evitando daños irreparables a los elementos de la vivienda, se instala un sistema de puesta a tierra que protegerá al generador, tablero de control y la vivienda, se instalará una varilla copperwell de 25 micras de cobertura de cobre de 1.8 metros de longitud.

#### **2.4.8. Conclusiones**

- Con la ayuda de los datos obtenidos en la medición del caudal de agua de 5 lt/seg, se puede realizar los cálculos, para determinar el tipo de turbina a ser implementado en la pico-generación.
- Por medio de la determinación de la turbina y un estudio de carga de la vivienda teniendo una potencia de 400W se puede seleccionar el generador para su implementación.
- Con la ayuda del software de cálculo MATLAB facilita los cálculos para la determinación de la curva de operación del generador y conocer el rango de operación que tiene que tener el mismo.

## CAPÍTULO III

### 3. Aplicación y/o validación de la propuesta

#### 3.1. Análisis de resultados

Concluido con la selección de los componentes ha utilizas en el sistema de microgeneración, se procedió a la construcción de la misma y realizando pruebas correspondientes para determinar su buen funcionamiento.

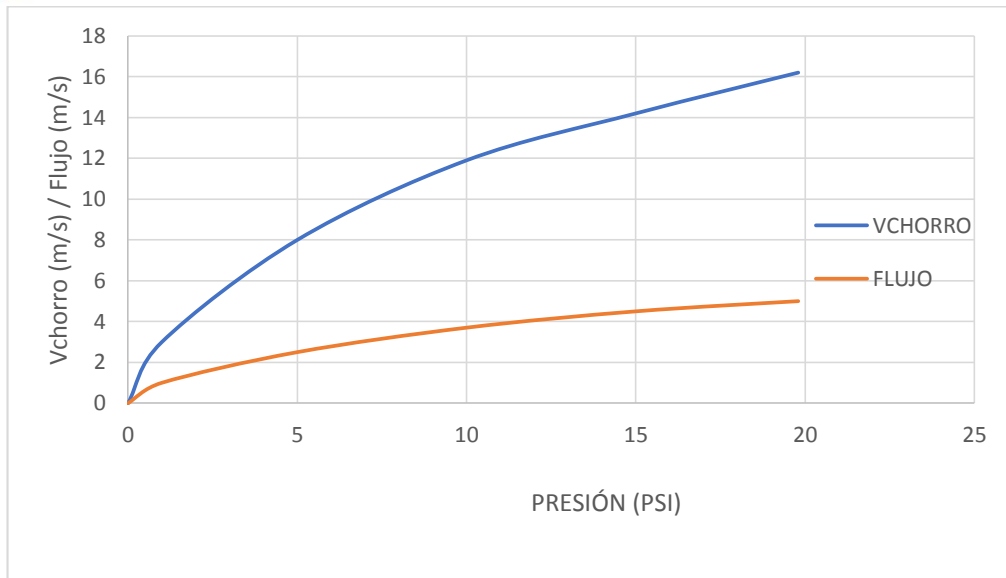
- Tubería de presión: al dimensionar la tubería de presión su distancia fue de 70 metros, con un diámetro de 2" de polietileno de alta densidad, el diseño realizado dio como resultado una presión de 19,88 PSI, la tubería utilizada tiene una resistencia máxima de presión de hasta 60 PSI, la cual satisface la necesidad para una buena operación y no tener problemas de presión en la tubería por el caudal de agua.
- Turbina hidráulica: dimensionada la turbina a utilizar dependiendo del tipo de caudal y altura neta, se selecciona una turbina tipo Turgo recomendable para utilización de sistema de microgeneración; cuyo torque se tiene un valor de 5.9 N.m. el diámetro del inyector tiene un valor de a su salida es de 19.6 mm.

El acople que existe entre la turbina y generador es directo por medio de un chavetero, la cual permite despreciar las perdidas por el acople.

- Generador eléctrico: luego de conocer la velocidad de la turbina que va tener por medio del caudal y altura se procede a la selección del generador el cual tiene 1800 RPM, con una frecuencia eléctrica de 60 Hz, su nivel de voltaje generado va hacer de 120 V, teniendo un aislamiento tipo H.
- Sistema de control: se seleccionó un sistema de control SENTRON PAC el cual ayudara a la medición de los parámetros de generación, para tener un mejor seguimiento de la energía y potencia entregada por el generador a la vivienda.

El sistema de microgeneración alimentara una vivienda cuya potencia de demanda calculada es de 400W, cuyos circuitos de iluminación y fuerza están detallados en el Anexo N°2.

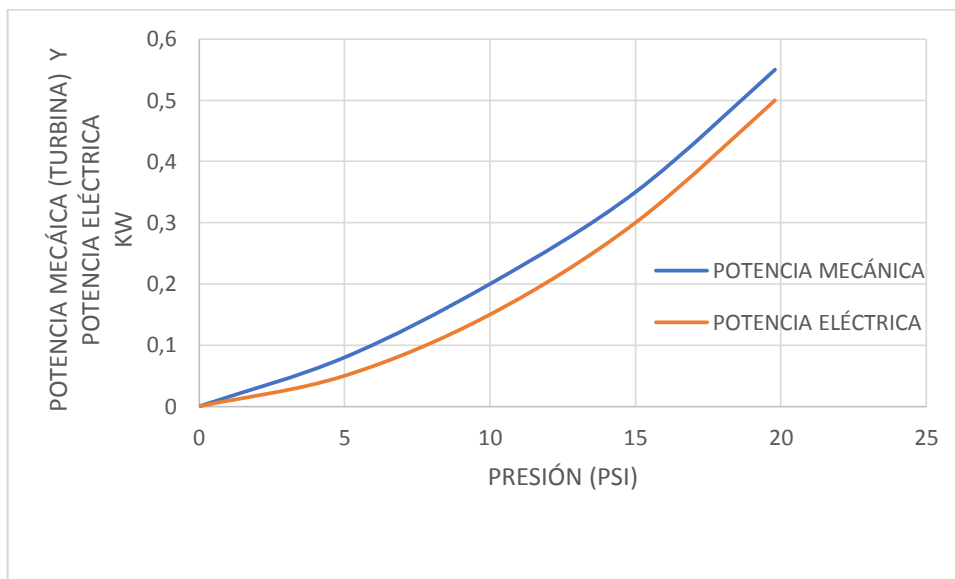
El modelo del sistema de microgeneración se puede detallar los datos de generación, en la figura 3.1., se puede observar la velocidad de chorro y el fluido va en aumenta gradualmente la presión hidrostática, los valores obtenidos, alcanzando la tubería una presión de 19,88 PSI, una velocidad de chorro de 16,6 m/s y un fluido de caudal de 5 lt/s.



**Figura 3.1.** Velocidad de chorro y flujo de caudal de agua VS Presión de la tubería.

**Elaborado por:** Antonio Tapia

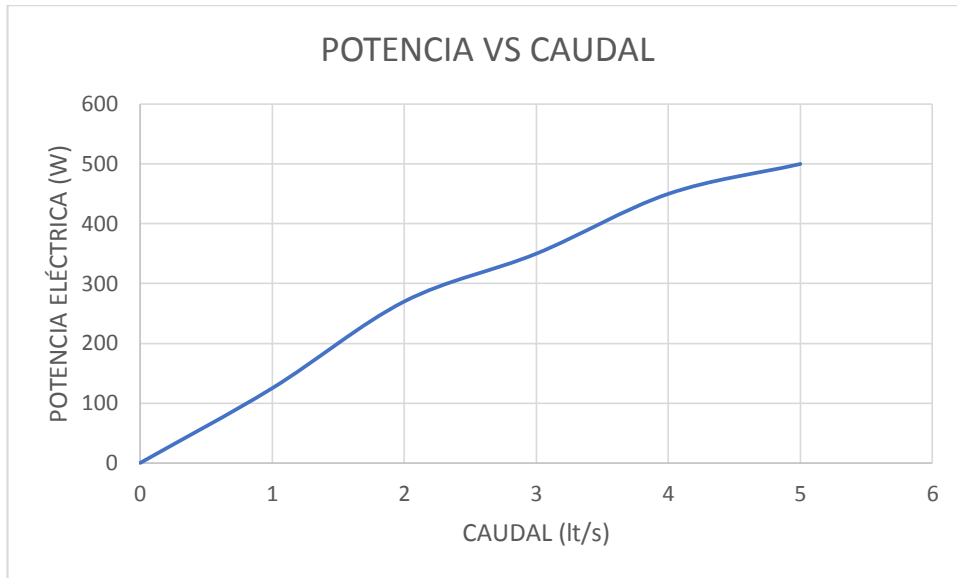
La figura 3.2., describe de cómo va en aumento de la potencia de la turbina con respecto a la presión hidráulica, la curva expresada es la potencia mecánica generada y la potencia eléctrica esperada por el generador con la aplicación de la turbina Turgo. A medida que la presión aumenta y llega a su valor nominal, las curvas de potencia se alejan debido al rendimiento de la turbina del 85%, llegando a una potencia mecánica de 0,57 kW y una potencia eléctrica de 0,5 kW.



**Figura 3.2.** Potencia Mecánica y Potencia Eléctrica VS Presión de la tubería.

**Elaborado por:** Antonio Tapia

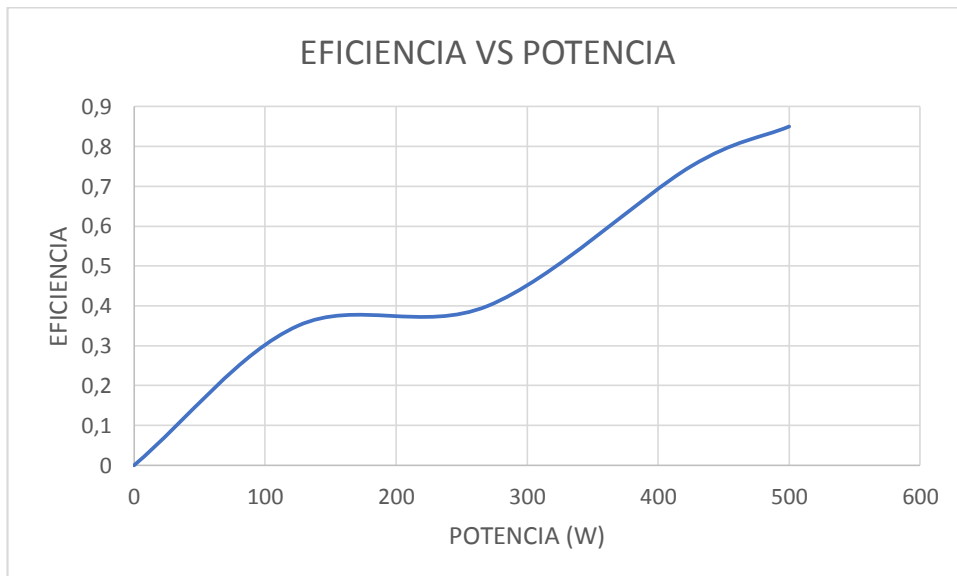
En la figura 3.3. se observa que al incrementar el caudal de agua la generación de energía eléctrica va en aumento hasta llegar a su punto máximo de generación en vacío.



**Figura 3.3.** Potencia eléctrica vs caudal de agua.

**Elaborado por:** Antonio Tapia

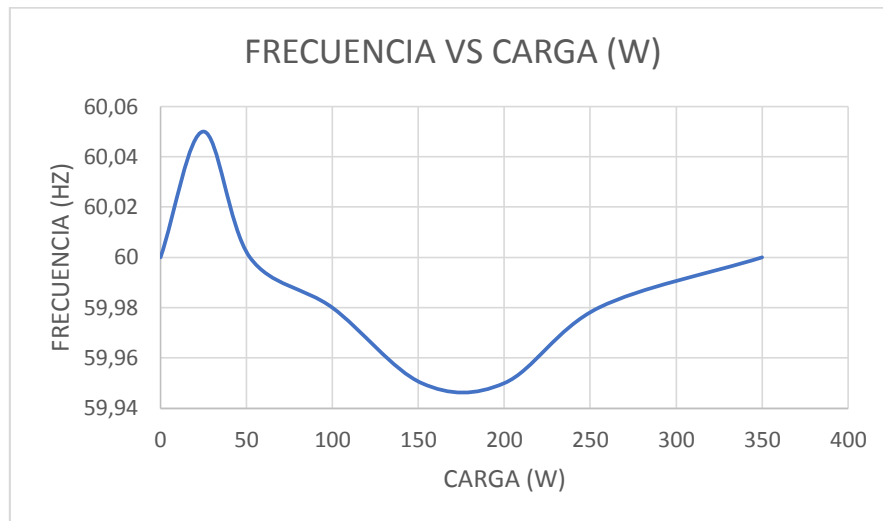
En la figura 3.4., la eficiencia de la turbina incrementa a la par de la potencia generada por la turbina y el generador.



**Figura 3.4.** Curva de eficiencia vs potencia.

**Elaborado por:** Antonio Tapia

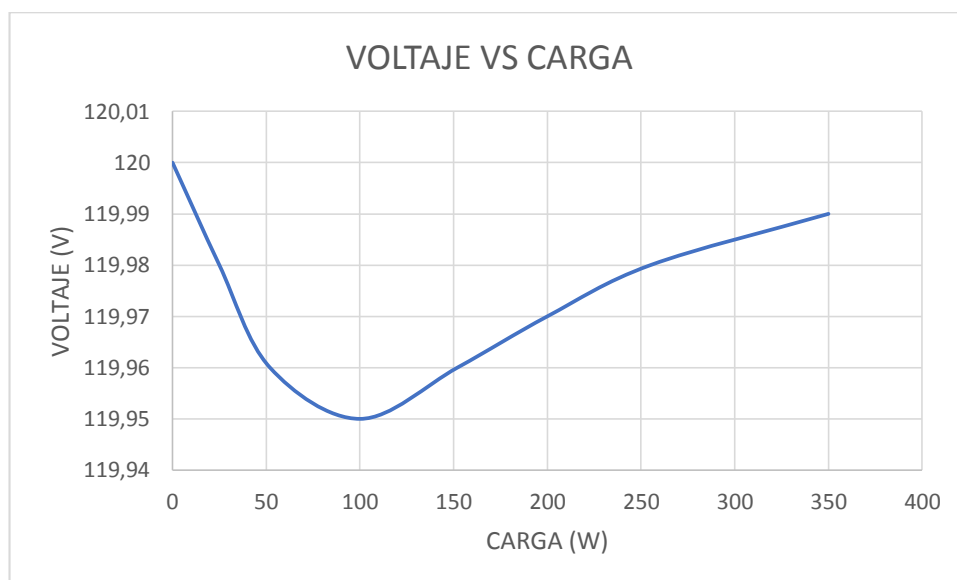
En las figuras 3.5 y 3.6, las pruebas realizadas fueron con una carga de 350W, el ensayo realizado consiste en mantenerle al generador en vacío e ir ingresando cargas, para conocer el comportamiento que va a tener el generador.



**Figura 3.5.** Curva de frecuencia vs carga.

**Elaborado por:** Antonio Tapia

En la figura 3.5., los valores censador del generador al momento de su arranque en vacío obtiene un pico de frecuencia de 60,05Hz, se ingresa carga al sistema de generación su frecuencia decae a 59,95Hz, al instante de seguir incrementando la carga la frecuencia se va estabilizando hasta llegar a su valor nominal de 60Hz.



**Figura 3.6.** Curva de voltaje vs carga.

**Elaborado por:** Antonio Tapia



En la figura 3.6., los valores censados sin carga y al introducir carga, se tiene una caída mientras va incrementando la potencia de las cargas del sistema, teniendo un voltaje mínimo de 119,95V y su valor máximo de 120V, cabe mencionar que el voltaje fluctuó por unos segundos hasta estabilizarse en 119,99V.

### 3.2. Validación técnica-económica de resultados

Para la determinación de los costos de la implementación de la pico central hidroeléctrica, se utiliza el método de depreciación de línea recta, la cual distribuye el valor depreciable a lo largo de la vida útil de una forma igualitaria, es adecuado para activos cuyo desgaste físico u obsolescencia no sucede inmediatamente.

**Tabla 3.1.** Gastos directos

Detalle	Cantidad	V. Unidad (\$)	V. Total (\$)
Panel de Control	1	1500	1500
Generador y Turbina	1	900	900

Elaborado por: Antonio Tapia

**Tabla 3.2.** Gastos directos

Detalle	Cantidad	V. Unidad	V. Total
Panel de Control	1	1500	1500
Generador y Turbina	1	900	900
<b>Subtotal</b>			\$ 2400
<b>I.V.A. 12 %</b>			\$ 288
<b>Total</b>			\$ 2688

Elaborado por: Antonio Tapia

**Tabla 3.3.** Cálculo de la depreciación

Detalle	Costo (\$)	% residual	Valor residual	Vida útil	Depreciación anual
Sistema de pico-generación	2688	10	268,8	8	302,40

Elaborado por: Antonio Tapia

### **3.3. Evaluación de impacto de resultados**

Se puede analizar los impactos a tomarse en cuenta del presente trabajo de titulación.

#### **3.3.1. Impacto Social**

Al mencionar el impacto social en la presente propuesta de titulación, se trata de los beneficios que puede traer a la sociedad o a su vez a los usuarios del sistema de pico-generación, y así contribuir con un abastecimiento de energía confiable.

#### **3.3.2. Impacto Tecnológico**

Mediante la propuesta tecnológica se pretende aprovechar el avance de la tecnología en los sistemas de automatización, aplicando equipos tecnológicos que faciliten la adquisición de datos del sistema de generación implementado, las cuales permitirán el monitoreo de los parámetros energéticos del generador.

#### **3.3.3. Impacto Ambiental**

La propuesta planteada no tiene ningún impacto ambiental, ya que el caudal utilizado para la generación es redireccionado hacia el río, el sistema de monitoreo no genera contaminación ambiental ya que se encuentra en lugar aislado fuera de la corrosión.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se realizó investigación bibliográfica, la misma que permitió el diseño del sistema de microgeneración obteniendo una potencia óptima de 350W a una altura de 14 metros aplicando investigación de campo y experimental.
- El diseño la turbina Turgo con unas dimensiones de 150mm siendo apropiada para la generación de energía, tiene un torque mecánico de 2.9 N.m.
- Al realizar los cálculos y selección de los elementos para la pico-central, se realizó pruebas de funcionamiento de la tubería de presión, turbina, generador, cuyo sistema de generación tiene un caudal de 5 lt/s, una velocidad de chorro de agua de 16.6 m/s, a una presión de 19.88 PSI, teniendo una velocidad de 1800 rpm.
- El costo de inversión de 2688 dólares americanos, la cual no es elevado y no generara impacto ambiental, es un sistema amigable con el medioambiente.

### Recomendaciones

- Luego de haber sido implementado el sistema de generación es necesario hacer un estudio de distorsión armónica, para garantizar el suministro y tener una buena estabilidad en el sistema.
- Con los datos obtenidos para la generación hidráulica a pequeña escala, es necesario en un futuro realizar un nuevo estudio de carga y conocer si el generador no está sobrecargado.
- Para tener un control óptimo en los parámetros de medición del generador, se puede colocar un PLC y poder subir los datos a la nube y tener un mejor seguimiento de los parámetros eléctricos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. A. A. a. J. S. A. D. S. Benzon, «"Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present,"» *Applied Energy*,, vol. vol. 166, pp. pp.1-18, 2016/03/15.
- [2] P. E. P. S. a. J.-P. D. K. Gaiser, «"An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response surface methodology,"» *Renewable Energy*, vol. vol. 85, pp. pp.406-418, 2016/01/01.
- [3] B. H. S. a. J. D. B. S. J. Williamson, «"Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis"» *Renewable Energy*, vol. 61, 2014.
- [4] «Expo Energía,» 18 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.exposolucionesenenergia.com/blog/historia-energia-hidraulica.php?m=>. [Último acceso: 21 06 2021].
- [5] M. Basar, A. Ahmad, N. Hasim y K. Sopian, «Introduction to the Pico Hydro Power and the Status of Implementation in Malaysia,» *IEEE*, 09 Febrero 2012.
- [6] K. Latoufis, A. Konstantinidis, S. Giala-Fikari y N. Hatziargyriou, «Comparison of Coreless and Soft Magnetic Composite Core Axial Flux Permanent Magnet Generators for Locally Manufactured Pico-Hydro Plants,» *IEEE*, 09 Mayo 2019.
- [7] V. Peña-García, DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RÍOS NO, Piura: Universidad de Piura, 2013.
- [8] A. Escriva, Introducción a la Tecnología Energética, Valencia - España, 2014.
- [9] «ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales electricas/1347-central-hidroelectrica>. [Último acceso: 22 Junio 2021].
- [10] C. G. Santiana Espín, ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA REPOTENCIACIÓN DE LA MINI CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 2MW DE LA EMPRESA UCEM – CEM, PLANTA CHIMBORAZO, Riobamba: Escuela Superior Politécnica del

Chimborazo, 2016.

- [11] M. Cordona Valencia, DESARROLLO DE UN MÉTODO DE DISEÑO Y ANÁLISIS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS TURBINAS DE ACCIÓN DE FLUJO CRUZADO PARA PICO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, Medellín: INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO, 2016.
- [12] L. Peña Pupo, E. Fariñas Wong, H. Domínguez Abreu y J. Fong Barrio, «Ajuste del punto de operación de micro-turbinas hidráulicas a través del método de regulación de velocidad combinada,» *Universidad de Oriente*, vol. 40, n° 1, 2020.
- [13] F. Coz, Manual de mini y microcentrales Hidráulicas, Lima: ITDG.
- [14] «HidrojINGers,» 13 01 2015. [En línea]. Available: <https://www.hidrojing.com/como-calcular-el-golpe-de-ariete/>. [Último acceso: 18 08 2022].
- [15] OLADE, «Centrales hidroeléctricas,» OLADE.
- [16] S. J. B. J. D. & S. B. H. Williamson, «Site Implementation of a Low-Head Pico-Hydro Turgo Turbine,» *Renewable Energy in the Service of Mankind*, 2015.
- [17] S. Giraldo Jiménez, PRUEBA DE UNA MICROTURBINA TIPO MICHEL-BANKI DE BAJA POTENCIA, Medellín: Universidad EAFIT, 2015.
- [18] G. Moreira Ribiero, Analysis and Testing of the IPB Pico-hydro Emulation Platform with Grid Connection, Braganca: INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANCA, 2019.
- [19] V. Leite, J. Couto, A. Ferreira y J. Batista, «A practical approach for grid-connected pico-hydro systems using conventional photovoltaic inverters,» *IEEE*, pp. 1-6, 2016.
- [20] P. Anderson y I. Fouad, Power System Control and Stability, IEEE Press power engineering series. IEEE Press.
- [21] R. E. Vélez Iñiguez, FACTIBILIDAD DE SISTEMAS DE MICRO Y MINI HIDROELÉCTRICAS COMUNITARIAS RURALES EN EL AZUAY, Cuenca: Universidad de Cuenca, 2013.
- [22] S. Morales, L. Corredor, J. Paba y L. Pacheco, «Stages in the development of a small

hydropower project: Context and implementation basic criteria,» *DYNA*, 2014.

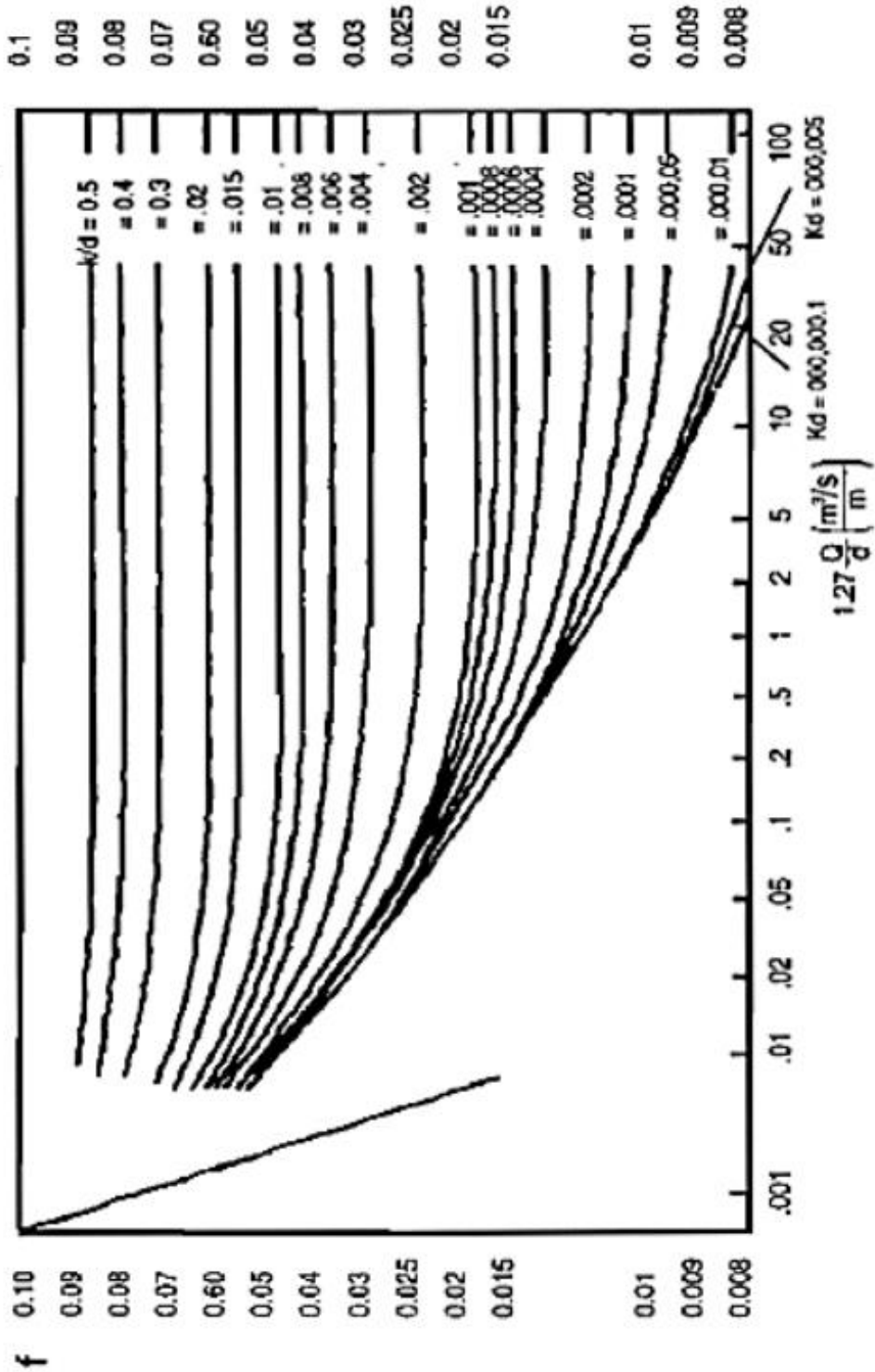
- [23] A. B. García Ortiz, MODELO DE PICO TURBINA PELTON PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS RURALES, Huancayo - Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017.
- [24] M. B. Irazusta, DISEÑO DE MICROTURBINA TURGO, Universidad Nacional de Cordoba, 2018.
- [25] A. Robinson and J. Scott, Development of the Turgo turbine., 2018.
- [26] M. L. B. I. S. R. y. C. R. Teresa Reyna, MICROTURBINAS HIDRÁULICAS. DISEÑO, ADAPTACIONES PARA ENSEÑANZA DE MICROGENERACIÓN, Buenos Aires: Universidad Nacional de Cordoba, 2018.
- [27] M. G. Mohaded, Turbina hidráulica para generación de energía., Córdoba: Universidad Nacional de Cordoba, 2018.
- [28] D. Benzon, G. Aggidis y J. Anagnostopoulos, «Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present,» 2016.
- [29] E. V. L. Cuesta Diego, "Aprovechamientos hidroeléctricos", Madrid: PISCEGRAF.
- [30] B. H. S. a. J. D. B. S. J. Williamson, «"Performance of a low-head pico hydro Turgo turbine,"» *Applied Energy*, vol. vol. 102, pp. pp.1114-1126, 2013/02/01.
- [31] K. E. P. S. P. &. D. J.-P. Gaiser, «An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response surface methodology,» *Renewable Energy*, 2016.
- [32] J. L. D. A. J. C. S. J. F. &. A. M. Clarembaux Correa, «Desing procedure for a Turgo type turbine using a three-dimensional potential flow».
- [33] ENDESA, 27 01 2022. [En línea]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generador-electrico>. [Último acceso: 27 01 2022].
- [34] «Análisis de aspectos eléctricos para el diseño de un parque offshore de generación

undimotriz».

- [35] S. Palella y F. Martins, “Metodología de la Investigación Cuantitativa”, Venezuela: FEDUPEL, 2006.
- [36] M. T. y. Tamayo, “Proceso de Investigación Científica”, México.
- [37] D. B. V. Dalen, “Estrategia de la Investigación Experimental”, Madrid: marcombo, 2015.
- [38] R. Ruíz, “El Método Científico y sus Etapas”, México D.F., Grijalbo, 2007. .
- [39] M. A. G. Mendoza, Investigación, escritura y publicación, Bogotá: Primera ed., Bogotá: Ecoe Ediciones, 2010.
- [40] H. Ñ. P. y. E. Mejía, “Metodología de la Investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis”, Bogotá: Cuarta ed., Bogotá: ediciones de la U, 2014.
- [41] SIEMENS, MULTIMETRO SENTRON PAC 3200.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Diagrama de Moddy





**ANEXO 2.** Estudio de carga para la selección del generador, utilizado en el sistema de pico-generación.

Descripción	Puntos	Potencia (W)	Potencia total (W)
<b>Iluminación</b>	5	20	100
<b>Tomacorrientes</b>	3	100	300
<b>Total, de potencia</b>	-	-	400

**ANEXO 3.** Terminación de la turbina Turgo y ubicación de generador.



**ANEXO 4.** Prueba de funcionamiento del sistema de microgeneración.



ANEXO 5. Torque y Potencia del inyector.

Componente tangencial del movimiento (lbm-ft / sec ^2)

%V inyector	u (ft/sec)	Entrada	Salida	Fuerza (N)	Rpm	(ft-lbf)	(N-m)	Potencia (hp)	Eficiencia (%)	Watts	%pico
96,00	53.2	-5.4	5.3	-1.5	3618	0.0	-0.1	-0.03	-3.58	-19.9	-4.3%
94,00	51.2	5.4	-5.2	1.5	3542	0.0	0.1	0.03	3.51	19.5	4.2%
92,00	50.1	16.5	-15.5	4.2	3467	0.1	0.2	0.09	10.30	57.2	12.5%
90,00	49.0	26.5	-26.2	7.0	3392	0.2	0.3	0.15	16.8	93.3	20.0%
88,00	47.9	37.4	-36.9	10.2	3316	0.3	0.4	0.20	22.9	127.7	27.3%
86,00	46.8	48.2	-47.5	13.1	3241	0.4	0.6	0.25	29.8	160.5	34.5%
84,00	45.7	59.6	-58.1	13.0	3165	0.5	0.7	0.30	34.4	191.6	41.0%
82,00	44.6	69.7	-68.7	16.5	3090	0.6	0.8	0.35	39.7	221.1	47.5%
80,00	43.5	80.4	-79.1	19.0	3012	0.7	0.9	0.39	44.7	248.8	53.2%
78,00	42.5	91.2	-89.4	22.0	2930	0.8	1.1	0.44	49.4	275.0	58.5%
76,00	41.4	101.5	-100.5	25.1	2862	0.9	1.2	0.47	53.9	299.4	64.0%
70,00	38.1	134.3	-132.0	27.8	2635	1.1	1.5	0.55	65.32	362.4	77.5%
68,00	37.0	144.1	-142.3	36.2	2485	1.2	1.7	0.60	68.3	380.7	81.5%
66,00	36.0	155.2	-153.7	39.7	2413	1.3	1.8	0.62	71.4	396.9	88.0%
64,00	34.5	166.5	-163.2	42.5	2148	1.4	1.9	0.63	74.0	411.5	96.1%
57,00	31.0	203.5	-200.5	45.2	2111	1.5	2.3	0.70	80.8	449.2	96.9%
56,00	30.2	209.0	-206.2	55.2	2075	1.6	2.4	0.70	81.52	452.3	97.6%
55,00	29.8	214.0	-211.0	57.0	2030	1.9	2.5	0.71	82.1	456.2	98.1%
54,00	29.2	219.6	-216.1	58.4	1995	1.9	2.5	0.71	82.6	459.1	98.9%
53,00	28.5	225.0	-222.0	60.0	1940	2.0	2.6	0.72	83.09	461.2	99.2%

<b>52,00</b>	28	230.7	-227.1	61.2	1920	2.0	2.7	0.72	83.4	461.7	99.5%
<b>51,00</b>	27.5	235.8	-232.0	63.2	1890	2.1	2.7	0.73	83.60	465.5	99.8%
<b>50,00</b>	27.1	241.2	-236.9	64.2	1870	2.1	2.8	0.73	83.98	466.9	99.95%
<b>49,00</b>	26.4	246.3	-243.5	66.0	1847	2.1	2.8	0.74	84.13	467.4	100.0%
<b>48,00</b>	26.1	251.85	-248.3	67.5	1805	2.2	2.9	0.74	84.21	468.5	100.1%
<b>47,00</b>	25.5	257.4	-253.7	70.6	1770	2.2	3.0	0.74	84.21	500.0	100.1%

**ANEXO 6.** Características de la turbina Turgo.

<b>V inyector (m/s)</b>	<b>V rodete (m/s)</b>	<b>RPM</b>	<b>Flujo (lt/s)</b>	<b>Potencia de la turbina (kW)</b>	<b>Potencia eléctrica (kW)</b>	<b>PSI</b>
<b>16.6</b>	8.0	1809	5	0.553	0.500	19.8
<b>15.9</b>	7.8	1776	5	0.524	0.470	19.2
<b>15.6</b>	7.7	1743	5	0.495	0.445	18.5
<b>15.3</b>	7.5	1709	4	0.467	0.495	17.8
<b>15.0</b>	7.4	1674	4	0.439	0.467	17.0
<b>14.7</b>	7.2	1639	4	0.412	0.439	16.3
<b>14.4</b>	7.1	1603	4	0.385	0.412	15.6
<b>13.7</b>	6.7	1529	4	0.334	0.385	14.2
<b>13.4</b>	6.6	1490	4	0.309	0.394	13.5
<b>13.0</b>	6.4	1450	4	0.285	0.309	12.8
<b>12.6</b>	6.2	1409	4	0.262	0.285	12.1
<b>12.3</b>	6.0	1367	4	0.239	0.262	11.4



<b>11.9</b>	5.8	1324	3	0.2	0.239	10.7
<b>11.5</b>	5.6	1279	3	0.2	0.166	9.9
<b>10.6</b>	5.2	1184	3	0.2	0.135	8.5
<b>9.7</b>	4.8	1081	3	0.1	0.10	7.1
<b>8.7</b>	4.3	967	3	0.1	0.072	5.7
<b>7.5</b>	3.7	837	2	0.1	0.047	4.3
<b>5.3</b>	2.6	592	2	0.0	0.016	2.1
<b>4.3</b>	2.1	483	1	0.0	0.009	1.4
<b>3.1</b>	1.5	342	1	0.0	0.003	0.7
<b>0.0</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0

**ANEXO 7.** Programación de la curva de operación del generador.

```
% UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
% FACULTAD CIYA
% MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA
% CURVA DE CAPABILIDAD DE UN GENERADOR SÍNCRONO
% DATOS
clc;
disp('INGRESE LOS DATOS :');
S=input('INGRESE EL VALOR DE LA POTENCIA APARENTE EN (KVA): ');
V=input('INGRESE EL VALOR DEL VOLTAJE EN (KV): ');
fp=input('INGRESE EL VALOR DEL FACTOR DE POTENCIA: ');
Xd=input('INGRESE EL VALOR DE LA REACTANCIA SÍNCRONA EN p.u: ');
n=input('Pulse 1 si el f.p. está en adelanto, de lo contrario pulse 2: ');
disp('RESULTADOS :');
% CAMBIO A p.u
% LA POTENCIA APARENTE SE LE LLEGA A COGER COMO POTENCIA BASE Y
POTENCIA
% REAL Y NOS QUEDA LA SIGUIENTE FORMULA  $S_{pu} = S_{base} / S_{real}$ 
Spu=S/S;
fprintf('POTENCIA APARENTE BASE ES = %1.3f\n',Spu);
% EL VOLTAJE SE LE LLEGA A COGER COMO VOLTAJE BASE Y VOLTAJE REAL
% Y NOS QUEDA LA SIGUIENTE FORMULA  $V_{pu} = V_{base} / V_{real}$ 
Vpu=V/V;
fprintf('VOLTAJE BASE ES = %1.3f\n',Vpu);
% CÁLCULO DEL ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA
ang=acos(fp);
if n==1
    ang=ang;
else
    ang=-ang;
```

```

end
%CÁLCULO DE LA CORRIENTE
I=Spu/Vpu;
Iang=(ang*(180/pi));
I1=I*cos(Iang*pi/180);
I2=I*sin(Iang*pi/180);
Itotal=complex(I1,I2);
fprintf('LA CORRIENTE p.u = %1.3f\n',I);
fprintf('EL ÁNGULO DE LA CORRIENTE EN GRADOS = %1.3f\n',Iang);
%CÁLCULO DEL VOLTAJE INTERNO DEL GENERADOR
E0=Vpu+j*Xd*Itotal;
E=abs(E0);
Ean=angle(E0)*(180/pi);
fprintf('EL MÓDULO DEL VOLTAJE INTERNO DEL GENERADOR p.u = %1.3f\n',E);
fprintf('EL ÁNGULO DEL VOLTAJE INTERNO DEL GENERADOR EN GRADOS =
%1.3f\n',Ean);
%CÁLCULO DE LA POTENCIA MÁXIMA
Pmax=Spu*fp;
fprintf('LA POTENCIA ACTIVA MÁXIMA p.u = %1.3f\n',Pmax);
Qmax=Spu*sin(acos(fp));
fprintf('LA POTENCIA REACTIVA MÁXIMA p.u = %1.3f\n',Qmax);
%CÁLCULO DE LA POTENCIA MÍNIMA
Pmin=0.5*Pmax;
fprintf('LA POTENCIA ACTIVA MÍNIMA p.u = %1.3f\n',Pmin);
%LÍMITE DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DEL ESTATOR
Q=-Spu:0.1:Spu;
P=sqrt(Spu.^2-Q.^2);
hold on,grid on;
plot (Q,P,'y','LineWidth',2);
title('CURVA DE CAPABILIDAD DEL GENERADOR SÍNCRONO');
xlabel ('Potencia Reactiva Q');ylabel ('Potencia Activa P');

```

% LÍMITE DE POTENCIA MÁXIMA Y MÍNIMA

Q=-Spu:0.1:Spu;

Pmax=Pmax\*ones(1,length(Q));

Pmin=Pmin\*ones(1,length(Q));

plot(Q,Pmax,'-r',Q,Pmin,'b','LineWidth',2);

% LÍMITE DE LA CORRIENTE DE EXITACIÓN NOMINAL

axis([-1 1 0 1]);

delta=linspace(0,(2\*pi));

P\_n=(((E\*Vpu)/Xd)\*sin(delta));

Q\_n=(((E\*Vpu)/Xd)\*cos(delta)-(Vpu^2)/Xd);

plot(Q\_n,P\_n,'r','LineWidth',2);

% LÍMITE DE ESTABILIDAD

k=-(Vpu^2/Xd);

x=linspace(k,1000);

e=sqrt((x-k).^3./(x));

plot(x,e,'LineWidth',2);

% FACTOR DE POTENCIA

x0=0:0.1:1;

an=acos(fp);

y0=tan(acos(an))\*x0; % Grafica del factor de potencia

plot(x0,y0,'m','LineWidth',2);

legend('LÍMITE DE TEMPERATURA DEL DEVANADO DEL ESTATOR','LÍMITE DE POTENCIA MÁXIMA','LÍMITE DE POTENCIA MÍNIMA','LÍMITE DE LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN','LÍMITE DE ESTABILIDAD','FACTOR DE POTENCIA');

